

Mathematik ohne Ziffern

Analoge Rechengeräte

Wilfried de Beauclair

Digital veröffentlicht bei der Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, April 2016.

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-53839

URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/5383>



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung – Nicht-kommerziell – Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/).

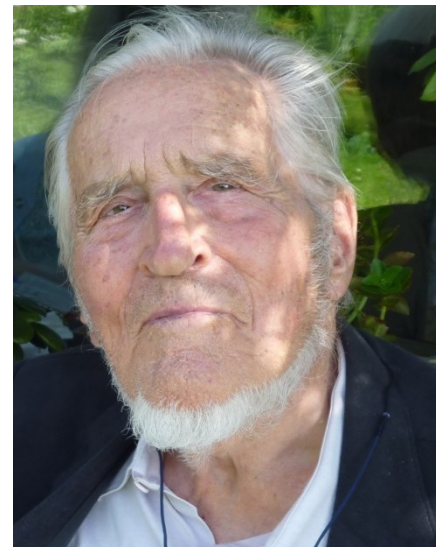
Vorbemerkung

Der Verfasser ist bestrebt, in dieser Arbeit zur Geschichte der Rechentechnik – nach ‚Rechnen mit Maschinen‘ (Vieweg, 1968) und der dreibändigen, von *Dr. Friedrich Genser* überarbeiteten und erweiterten Neufassung ‚Vom Zahnrad zum Chip‘ (Superbrain-Verlag, 2004) – nun auch die einstigen analogen mathematischen Instrumente bis zu den Analogrechnern / Integrieranlagen zu beschreiben und im Bild vorzuzeigen. Er war seit 1931 überzeugt vom didaktischen Wert der Anwendung von mathematischen Instrumenten im Rahmen eines ingenieurgerechten Mathematik-Unterrichts an Technischen Hochschulen und hatte sich der Entwicklung und dem Bau erst von Anschauungsmodellen, dann von Synthesatoren, Rechen- und Integrieranlagen zugewendet, bis er an der Konstruktion, Programmierung und zuletzt dem Einsatz von Digitalcomputern mitarbeitete.

Die Epoche der Entwicklung und der Anwendung des wissenschaftlichen Handwerkzeugs der feinmechanisch-analogen Technik (ca.1850 – 1950) wurde in Folge des Fortschritts zu digitaler Rechentechnik, zu Elektronik und Computern aller Größen innerhalb weniger Jahre verlassen und ist wohl endgültig abgeschlossen. Diese Spitzenerzeugnisse feinmechanischer Fertigung gerieten in unverdiente Vergessenheit; sie sind nur zum Teil in technischen Museen zu besichtigen. Diese als Bildband konzipierte Arbeit stellt einen Querschnitt durch die vom Autor voll miterlebte Entwicklung dar. Sie möchte kein Lehrbuch der instrumentellen Mathematik sein, sondern dazu beitragen, diese fruchtbaren hundert Jahre im Bewusstsein zu bewahren.

Der hier gebotene Text liegt als Manuskript vor. Der Verfasser hat ihn auf Grundlage seines umfangreichen Archivmaterials in den 1980-er Jahren abgefasst und im Winter 2015/2016 erneut aufgegriffen. Die zugehörigen Abbildungen und das Literaturverzeichnis existieren, sind aber leider derzeit nicht verfügbar. Den Interessierten können jedoch die Hinweise auf Sammlungen und weiterführende Literatur im Abschnitt D Wegweiser sein für eine eingehendere Kenntnisnahme.

Der Autor (geboren 1912) studierte ab 1930 an der Technischen Hochschule Darmstadt, war Assistent und wissenschaftlicher Mitarbeiter von *Prof. A. Walther* an dessen Institut für Praktische Mathematik (IPM) und wurde 1945 zum Dr.-Ing. promoviert. Später arbeitete er als Entwicklungsingenieur in der Computerindustrie und Referent beim Posttechnischen Zentralamt Darmstadt für Einrichtung und Programmierung von EDV-Anlagen zur Automatisierung der Postbankdienste. Er war ferner Mitarbeiter bei Normungsgremien und Lehrbeauftragter an der TH Darmstadt.



Blaustein bei Ulm/Donau im April 2016

Dr. W. de Beauclair
Birkenweg 25
89134 Blaustein

Inhalt

Vorbemerkung	3
Einleitung: NATURA NON FACIT SALTUS	9
A. Mechanische Instrumente und Anlagen.....	13
A.1. Zeichengeräte, Rechen- und Funktionsgetriebe.....	13
A.1.1. Zeichengeräte	14
A.1.2. Koordinatographen zum genauen Aufzeichnen von Wertepaaren	14
A.1.3. Pantographen (Storchenschnabel),.....	14
A.1.4. Affinigraphen	15
A.1.5. Kurvenlängen-Messgeräte („Kurvimeter“).....	15
A.1.6. Funktionsgetriebe.....	15
A.1.7. Kinematische Vorrichtungen	16
A.1.8. Logarithmische Rechenschieber und -vorrichtungen	16
A.1.9. Netztafeln, Nomogramme und Nomographen.....	16
A.2. Rechnende Spezialgeräte	17
A.3. Algebraische Gleichungen und Gleichungssysteme.....	18
A.3.1. Geräte zum Lösen algebraischer Gleichungen	18
A.3.1.1. „Gleichungswaage“ nach George B. Grant 1896.....	18
A.3.1.2. Methode nach Rowning / Zemanek	19
A.3.2. Systeme linearer Gleichungen	19
A.3.2.1. Mechanisches Gerät nach <i>J. B. Wilbur</i> 1936.....	19
A.3.2.2. Maschine zum Auflösen linearer Gleichungssysteme mit bis zu 10 Unbekannten von <i>Ing. Josef Nowak</i>	19
A.3.2.3. Maschine für Probleme der linearen Planungsrechnung	20
A.3.2.4. Harmonische Synthesatoren	20
A.4. Differenziergeräte	20
A.4.1. Messen des Steigungswinkels	20
A.4.2. Stetig arbeitende Differenziergeräte.....	21
A.4.3. Kugeldifferentiatoren	21
A.5. Integriergeräte	21
A.5.1. Grund-Bauelemente.....	22
A.5.1.1. Integrier-, Mess- oder Planimeterrolle	22
A.5.1.2. Schneidenrad oder ‚scharfe Rolle‘	23
A.5.1.3. Reibrad auf rotierendem Kegel oder rotierender Scheibe	23
A.5.1.4. Kugel-Zylinder-Reibgetriebe	23
A.5.1.5. Kugelkalotte/Zylinder	23
A.5.1.6. Kugelintegrator	24
A.5.1.7. Kugel-Zylinder-Integrator.....	24
A.5.2. Hilfsverfahren und -geräte zur Flächenmessung.....	24
A.5.3. Planimeter mit Messrolle (Planimeterrolle).....	25
A.5.3.1. Grundplanimeter.....	25
A.5.3.2. Potenzplanimeter.....	27
A.5.3.3. Präzisionsplanimeter	27

A.5.3.4.	Produkt- und Stieltjesplanimeter	28
A.5.3.5.	Harmonische Analysatoren.....	28
A.5.4.	Integrimeter	30
A.5.5.	Integraphen	30
A.5.6.	Mehrstufige Integratoren	32
A.5.6.1.	Autokorrelator	32
A.5.6.2.	Eisenbahn-Zugkraft-Messwagen	32
A.5.6.3.	„Brennschlussgerät“ der Fa. A. OTT zur Rakete V 2	32
A.5.6.4.	„Ballistische Integraphen“	33
A.6.	Anlagen zur Lösung von Differentialgleichungen (DGM)	33
A.6.1.	Das Prinzip der Rückkopplung	34
A.6.2.	Darstellungssymbolik der Zusammenschaltung	34
A.6.3.	Verfahren zur Genauigkeitsprüfung	35
A.6.4.	Fahrdiagraph von <i>Udo Knorr</i> : die erste Integrieranlage	35
A.6.5.	Zweifach-Integraph IPM	36
A.6.6.	„Differential Analyser“ von <i>Vannevar Bush</i>	37
A.6.7.	Integrieranlage DGM IPM-OTT	39
A.6.7.1.	Entwicklung	39
A.6.7.2.	Bauprinzipien der Einzelgeräte der DGM IPM-OTT	40
A.6.8.	Weitere Integrieranlagen	42
A.6.8.1.	Integrieranlage der Firma ASKANIA	42
A.6.8.2.	Integrieranlage von <i>Rolf Engel</i> / Danzig	42
A.6.8.3.	Integrieranlage MINDEN.....	43
A.6.8.4.	Sonstige Entwicklungen – kurze Hinweise	44
A.6.8.5.	Bedeutung der Analogrechner – gestern und heute	44
A.7.	Schwingungsüberlagerer	46
A.7.1.	Eindimensionale Fouriersynthese	46
A.7.2.	Zweidimensionale Fouriersynthese	47
A.8.	Gezeitenrechner	47
A.9.	Anschauungsmodelle und Simulatoren	48
A.9.1.	Demonstrationsmodelle	48
A.9.1.1.	Schwingungsschreiber zur Veranschaulichung des Resonanzverhaltens	49
A.9.1.2.	Mechanisches Kettenleitermodell	49
A.9.2.	Simulationsmodelle und –verfahren	49
A.9.2.1.	Gummimembran-Modelle	49
A.9.2.2.	Seifenhaut-Modelle.....	50
A.9.2.3.	Spannungsoptische Modelle aus flachen Scheiben aus Plexiglas	50
A.9.2.4.	Bearbeitung von Schwingungsproblemen	50
A.9.2.5.	Nachbildung der Hundekurve	50
B.	Elektromechanische Analog-Geräte	51
B.1.	Funktionsgeneratoren und Kurvenabtaster	51
B.1.1.	Eingeben von einzelnen Funktionswerten.....	51
B.1.2.	Eingeben von Werten aus stetigen Funktionen.....	51
B.1.3.	Ausgabe	52
B.1.4.	Übertragung von Drehungen und Winkelstellungen	52
B.2.	Elektromechanische Rechenbaugruppen	52
B.3.	Anlagen zum Lösen von Gleichungen	53
B.3.1.	Lineare Gleichungssysteme	53
B.3.2.	Algebraische Gleichungen	53

B.4.	Differenzierschaltungen	54
B.5.	Elektromechanische Integratoren	55
B.5.1.	Elektro-optische Planimeter	55
B.5.1.1.	Lichtelektrisches Planimeter	55
B.5.1.2.	Gerät zur Bestimmung von Flächen in Landkarten	55
B.5.2.	Elektromechanischer Fahrzeitrechner	55
B.6.	Elektromechanische Integrieranlagen	55
B.6.1.	Integrieranlagen	56
B.6.2.	INTEGROMAT	56
B.6.3.	Digital Differential Analyzer	57
B.7.	Harmonische Analyse von Schwingungsschrieben	57
B.8.	Elektromechanische Fouriersynthese	58
B.8.1.	Eindimensionale Fouriersynthese	58
B.8.2.	Zweidimensionale Fouriersynthese	58
B.9.	Nachbildungen und Simulatoren	60
B.9.1.	Schwingungs-Differentialgleichungen	60
B.9.2.	Polynome höheren Grades	60
B.9.3.	Partielle Differentialgleichungen	60
B.9.4.	Inhomogene lineare Gleichungen	60
B.9.5.	Lineare Gleichungssysteme	61
B.9.6.	Netzmodelle	61
C.	Vollelektronische Analogrechner	63
C.1.	Diverse elektronische Rechenschaltungen	63
C.1.1.	Einrichtung zum statistischen Auf- bzw. Abrunden	63
C.1.2.	Frequenzwandler	63
C.1.3.	Variierbare Gleichspannungsverstärker	63
C.1.4.	Das Siemens-Regelmodell	64
C.2.	Elektronische Ziffern-Integrieranlagen „DDA“	64
C.2.1.	MADDIDA	64
C.2.2.	TRICE	65
C.3.	Elektronische Analogrechner	65
C.3.1.	Entwicklungen in Deutschland	66
C.3.1.1.	H. Hoelzer	66
C.3.1.2.	ELARD / TH Darmstadt	66
C.3.1.3.	UNIMAR / Uni Berlin	67
C.3.1.4.	EARI / Ilmenau	67
C.3.2.	Erste industrielle Analogrechner in Deutschland	67
C.3.2.1.	Schoppe & Faeser R4	67
C.3.2.2.	Telefunken RA 463/2	67
C.3.2.3.	Telefunken RA 800	67
C.3.2.4.	TELEFUNKEN RAT 700 und RA 742	68
C.3.2.5.	endim 2000 /Glashütte	68
C.3.3.	Der Höhenflug der industriellen Analogrechner	68
C.3.3.1.	Anfangsentwicklung weltweit	68
C.3.3.2.	Der Boom in den USA	69
C.3.4.	Hybridrechner	70
D.	Schlussbetrachtung	73
D.1.	Ist die analoge Denkweise am Ende?	73
D.2.	Museen und Sammlungen mit analogen Geräten	73
D.3.	Weiterführende Literaturverzeichnisse analoger Instrumente	73

Einleitung: NATURA NON FACIT SALTUS

Heute unter der absoluten Vorherrschaft der digitalen, d. h. der zählenden, Ziffern oder Bit verarbeitenden Rechenautomaten aller Größenordnungen tut es Not, an die uralte Tradition der stetig-analogen Denkweise bei der Bearbeitung mathematisch-technischer Probleme zu erinnern.

Naturvorgänge verlaufen stetig, kontinuierlich; es gibt (außer im subatomaren Bereich) kaum diskret zu zählende Abläufe. Alles Beobachten führt daher ebenfalls auf kontinuierlich zu beschreibende Ergebnisse.

Analog sind unterschiedliche physikalische Systeme, wenn sie sich trotz aller realer Unterschiede in Bezug auf Dimension, Zeitskala und dergleichen nach gleichen mathematischen Regeln verhalten. Ein der Untersuchung und Messung zugängliches Modell des wirklichen Systems ist dessen Analogon.

Mit dem Begriff analog wird aufgrund beider Sätze eine nicht gequantelte, nicht codierte Arbeitsweise mit einem Modellsystem verstanden, dem nicht eine ziffernmäßige diskrete Darstellung, sondern ein kontinuierlicher Ablauf des Signals zu Grunde liegt.

Es liegt in der Natur des sinnfälligen Begreifen-Wollens von bisher nicht bekannten und durchschaubaren Sachverhalten, dass der Mensch sie durch Vergleich mit ihm altbekanntem Ähnlichem zu vergleichen und damit zu erfassen sucht.

Auch jedes Messen ist ein Vergleichen mit Vielfachen von geeigneten, vereinbarten Größen. Selbst wenn dabei notwendigerweise gezählt werden musste, dienten als Zähleinheiten jeweils anschauliche Begriffe wie Fuß oder Elle, Eimer, Fuder oder Tagwerk, und zwar oft sogar für verschieden Objekte unterschiedliche Einheiten. Uralte Tontäfelchen enthalten Aufzeichnungen mit jeweils spezifischen Mengenangaben für z. B. Brote, Vieh, Sklaven. Reste dieser Zählweise gab es noch bis vor kurzem auch bei uns: es gab ein Schock Eier, nämlich 60, oder eine Mandel, das waren nur 15 Eier; es gab ein Ries (400 Bogen Schreibpapier) und ein Buch, das waren nur 24 Bogen. Das Dutzend als Zähleinheit und das Pfund hat sich entgegen aller Vorschriften bis heute erhalten. Erst im 18. Jahrhundert (1793-1800) wurden abstrakte Maßeinheiten definiert; sie haben sich nur sehr langsam und bis heute noch nicht voll durchgesetzt. Im täglichen Leben benutzt man ja kaum jemals diese künstlich erfundenen Maßeinheiten sondern sinnfällige Vergleichsgrößen: der Kleingärtner gräbt seine Baumgrube nicht 42 cm tief sondern zwei ‚Spatentiefen‘, und streut eine ‚Handvoll‘ Kalk auf die Baumscheibe. Von Anfang an wurde das Vergleichsmaß zum Verdeutlichen von Sachverhalten herangezogen. Eine Messerspitze Salz, ein Teelöffel Zucker, eine Tasse Mehl werden verwendet; ein Morgen, eine Tonne, eine Tagereise und andere waren sinnfällige Maßeinheiten und sind, wie beispielsweise Pferdestärke, vielfach bis heute geblieben. Die abstrakten metrischen Einheiten werden vorwiegend beim wissenschaftlichen Arbeiten verwendet und, wenn im Alltag, dann oft (selbst amtlich) falsch zitiert (km statt km/h bei Geschwindigkeitsbegrenzungen).

Der stetige Zeitablauf war selbstredend auch nicht anders messbar als durch analoge Vergleichsmodelle, durch Betrachten von erfahrungsgemäß stetig mit der Zeit ablaufenden Vorgängen wie z.B. das Rieseln in der Sanduhr oder von Wasser in Klepsidren und das Abbrennen von Kerzen; selbst die Sonnenuhr zeigt ja nur die Rotation der Erde als

Vergleichsmaß. Auch die Kirchturmuhren zeigen analog den (durch das Pendel gebremsten) zeitproportionalen Ablauf des Gewichtes an.

Auch das wichtigste und bis vor kurzem als Statussymbol des Ingenieurs geltende Rechenhilfsmittel, der gute alte logarithmische Rechenschieber (er wurde um 1600 von *Oughtred* eingeführt), ist ein reines Analoggerät: bei ihm werden die Abstände zwischen den Strichen der Skalen den Zahlenwerten zugeordnet, genau wie die Skalenwerte der Temperaturgrade beim Thermometer der Längenausdehnung des Quecksilberfadens bei Erwärmung.

Analoges Denken ist das ursprüngliche. Das Zählen und Rechnen mit Ziffern und Zahlen, mit gequantelten Werten setzt voraus, dass überhaupt ein Bedürfnis zum Rechnen besteht und ein rechengerechtes Zahlensystem erarbeitet ist. Urvölker zählten ‚eins - zwei - drei - viel‘; der Schäfer kannte jedes Tier und wusste ob die Herde vollzählig war ohne sie etwa zählen zu können. Nur die Priester-Gelehrten mussten den Sternenlauf beobachten und die Jahre zählen, hatten ein Zahlensystem und einen Kalender. Ansonsten bestaunte und bewunderte man die Werke des verehrten Schöpfergottes; erst mit dem Drang zur Ratio kam die Vermessenheit auf, sie nachrechnen zu wollen. Im Mittelalter war zum Bestimmen des Kalenders, insbesondere der heiligen Festtage (Ostern abhängig von den Mondzyklen) den Gelehrten das Rechnen nötig; das Verfahren hieß der ‚Computus‘. Im Orient und bei den Mayas gab es daher schon früh genaue Kalender, doch waren dort die Zahlensysteme ebenso unpraktisch wie auch bei uns die zum Zahlen-Schreiben bis ins hohe Mittelalter benutzten römischen Zahlzeichen I, V, X, L, C, D und M. Sie waren anfangs sinnfällige Kürzel für einen Finger, eine Hand oder zwei. Sie wurden jeweils bis zu viermal nebeneinander, nicht wie die heutigen Ziffern stellenwertig geschrieben. Zum Rechnen waren sie nicht geeignet; man rechnete analog und zählte (statt z. B. Rinder auf der Weide) mit ‚calculi‘ (= Rechensteinchen) auf einem Linienraster (‚abacus‘ = Rechenbrett), auf dem das Steinchen (Perle, Rechenpfennig) je nach seiner Lage 1, 5 oder 10, auch 50 oder 100 bedeutete.

Allerdings ist zu bedenken, dass in alten Zeiten unser menschliches Gedächtnis unvorstellbar besser gewesen sein muss als heute. In alter Zeit wurden lange Epen und die Lehren der Philosophen mündlich vorgetragen und auch gelehrt, und so wort-wörtlich über Jahrhunderte bewahrt. Türkische Märchen konnten damals und der Koran kann heute noch vielfach auswendig Wort für Wort wiederholt werden. Die Wissenschaften beruhten ganz auf dem Gedächtnis und dem Gespräch. Heute wird alles gedruckt und vergessen. Selbst Bibliotheken ersticken in der Masse des gedruckt Bewahrten und können das verlorene Gedächtnis nicht ersetzen. Heutige elektronische Speichermedien sind ohnehin kurzlebig; ihr Code wird bald unlesbar, sie werden nicht, wie Keilschrift-Archive, Jahrtausende überdauern.

Analoggeräte arbeiten mit kontinuierlichen Messgrößen, nicht von einer zur nächsten Ziffer springend, wie es die Zahnräder des Zählwerkes der Rechenmaschine erzwingen. Das Analoggerät arbeitet exakt, stetig, konform mit dem natürlichen Vorgang, aber mit aus seiner Bauweise bedingter begrenzter Genauigkeit; ein Rechenwerk arbeitet dagegen je nach Stellenzahl beliebig genau, jedoch nur zu diskreten Argumenten.

Jedes numerische Rechenverfahren für physikalisch-dynamische Vorgänge ist stets eine Approximation. Die heutigen iterativen Näherungsverfahren für digitale Rechenautomaten liefern lediglich eine beliebig dichte Folge von je nach der Stellenzahl hochgenauen Funktionswerten; diese werden dann zu einer treppenartigen Punktfolge aufgezeichnet, die alles andere als stetig und glatt ist. Die analoge instrumentelle Nachbildung eines stetigen Vorganges mit einem Modell gleicher mathematischer Beschreibung gibt dagegen (sofern sie realisierbar ist) eine durchaus exakte stetige Lösung im Rahmen der nicht zu überschreitenden instrumentellen Zeichengenauigkeit. Die den reinen Mathematikern bis vor kurzem als unfein geltenden Approximations-Verfahren sind heute im Zeichen des schnellen

Computers das Mittel der Wahl geworden und salonfähig, allerdings erst nachdem die Verfahren zur Abschätzung und Minderung der Rundungsfehler, die sich auch bei hohen Stellenzahlen aufsummieren können, hochgezüchtet waren und brauchbare Näherungslösungen zu erreichen waren. Sie sind heute um ein Vielfaches schneller als Analogverfahren, und sie sind überaus nützlich auch für solche Aufgaben, für die zweckmäßige Analoggeräte nicht zu realisieren sind.

Möglich wurde diese Wende vom analogen mathematischen Spezialinstrument zum universell programmierbaren Digital-Computer erst mit dem Aufkommen der Elektronik, der Transistoren. Mit den vorher allein zur Verfügung stehenden mechanischen Mitteln war eine hochleistungsfähige Rechenmaschine nicht zu bauen – das zeigten immer aufs Neue die Versuche von *Babbage* (1823) bis *Schilling* (1926) und *Weiner* (1923), und auch *Konrad Zuse* erkannte dies mit seinem ersten mechanischen Rechenautomaten Z 1. Selbst die Röhrentechnik (*Schreyer* 1942) konnte zwar das Prinzip des ultraschnellen Computers schaffen, aber noch nicht die zu fordernde Zuverlässigkeit und Einsatzfähigkeit.

So blieb bis um 1950 tatsächlich nur das mechanische Analoggerät für spezielle Aufgaben als einziges, aber sehr brauchbares Arbeitsmittel zuerst für den Astronomen, dann für den Ingenieur, den Physiker und den Mathematik-Praktiker. Diesen lag es auch nahe, bei den Versuchen, mathematisch definierbare, aber nicht streng lösbare Naturgesetze zu erfassen, für ihre technischen Probleme Modelle heranzuziehen, d. h. auf Geräte und Verfahren auszuweichen, die mit einer identischen Gleichung zu beschreiben sind. So gehorchen alle Schwingungsvorgänge einer Differentialgleichung, ob es nun das schwingende Medium einer Wassersäule im Rohr, ein Flugzeugflügel oder ein Strom im Schaltkreis ist. Eine Verkopplung mehrerer Integratoren bildet eine Differentialgleichung nach. Es bot sich also an, solche oft real einer Untersuchung unzugängliche Probleme am Analogon des mechanischen Integrators im Studierzimmer zu untersuchen und das Ergebnis auf die technische Anwendung zu übertragen.

Die Bedeutung der mathematischen Analoginstrumente wird unterstrichen dadurch, dass die Vorlesungen ‚Mathematik für Ingenieure‘ an Technischen Hochschulen zweckmäßig auch Übungen an solchen Geräten einschlossen; der Vorkämpfer für Anschaulichkeit im Unterricht, Professor *Alwin Walther* am Institut für Praktische Mathematik der TH Darmstadt, ließ nicht nur Anschauungsmodelle für besseres Verständnis des Vorlesungs-Stoffes bauen, sondern war auch maßgeblich beteiligt an der Entwicklung von analogen Großanlagen.

Eine Abkehr von dieser traditionellen und anschaulichen analogen Denkweise hin zum Programmieren digitaler Näherungsverfahren fiel anfangs schwer und brauchte seine Zeit. Diese verständliche Tradition zum analogen Nachbilden rechnerisch schlecht zu lösender Probleme erklärt auch, warum die sich anbahnenden Entwicklungen von digitalen Rechenautomaten anfangs vor allem nur dort Beachtung fanden, wo Militärs umfangreiche Arbeiten schnellstmöglich erledigt sehen wollten (Schusstafeln, Atomrüstung, Raketenbahnen).

Nachdem auch das frühere Zeichnen und Konstruieren am Reißbrett abgelöst ist durch computerunterstütztes Design am Bildschirm sind nun auch die einfachsten mathematischen Instrumente nicht mehr aktuell. Es ist heute sicher möglich, mittels Digitalisiertablett, CAD-Programm und Computer am Arbeitsplatz die Fläche und die höheren Momente einer aufgezeichneten Umrandung berechnen zu lassen; um wie viel einfacher, billiger und langlebiger war jedoch ein altes Planimeter.

Das Beispiel des analogen Vergleichs des an sich ja unmessbaren Zeitablaufs (Sonnenuhr) gegenüber dem Abzählen von sich periodisch konstant wiederholenden Mikrovorgängen (Quarzuhr) lehrt aber, dass wie ein jeder ‚Fortschritt‘ auch der zum digitalen Zählen und Rechnen nicht umkehrbar ist und weiterhin ausschlaggebend bleibt für die Errungenschaften der technischen Wissenschaften.

Das heute fast allgemeingültige Prinzip des ‚Digitalisierens‘, des Zerteilens in kleinste zu zählende Elemente und Schritte, fand seine seelische Vorbereitung in der Kunst seit dem Pointillismus, in der Musik und im Tanz durch die Abkehr von fließenden Melodienfolgen hin zum heute vorherrschenden Gezappel von Schlagzeug und Gliedmaßen, in Schrift und Sprache darin, dass kaum noch vollständige Sätze gelesen und verstanden werden können, sondern Comic-Sprechblasen Vorrang haben.

Sich weiterhin an die Analogtechnik als Vorstufe zu erinnern bleibt jedoch nützlich, denn jeder Schritt nach vorn basiert auf den vorweg geleisteten Schritten.

A. Mechanische Instrumente und Anlagen

Als mechanische Instrumente werden solche verstanden, die im Wesentlichen mechanisch arbeiten, auch wenn sie etwa einen Antrieb durch Elektromotor haben oder andere elektrische Hilfsfunktionen aufweisen wie z. B. eine lichtelektrische Kurvenabtastung oder Drehmoment-Verstärkung beziehungsweise -Übertragung. Der mathematischen Funktion dieser mechanischen Geräte wird also bei Wegnahme etwaiger elektrischer Bauteile kein Verlust im Prinzip zugefügt. Somit ist z. B. auch ein modernes Planimeter mit Messrollen-Abgriff und LCD-Anzeige ein mechanisches Planimeter, weil die Flächenmessung allein auf der Funktion der Planimeterrolle basiert.

Im Gegensatz dazu sind elektromechanische Analog-Geräte (in B) solche, die beide Effekte miteinander verquicken, um ein mathematisches Problem wiederzugeben, d. h. die ohne den elektrischen Teil nicht funktionsfähig wären. Als Beispiel hierfür diene die Helligkeitsmessung mittels Fotozelle eines mechanisch teilweise abgedunkelten Lichtstroms zur Flächenmessung.

Elektronische oder rein elektrische Analog-Geräte (in C) kommen dagegen ohne jedes mechanische Wirkungselement aus, abgesehen von manuell einzugebenden Ausgangswerten und Koppelverbindungen. Hier bewegt sich also, grob gesagt, sichtbar nichts als ein Anzeige- oder Schreib-Element für das Ergebnis.

Für pädagogische Zwecke, also für Lehre und Ausbildung sind einfache mechanische Geräte eindrucksvoller, weil ihr Bewegungsablauf sinnfälliger ist für das Begreifen des mathematischen Inhaltes als ein regungslos dastehendes elektronisches Netzwerk. Ein Kreis ist mit dem Zirkel schnell zu zeichnen. Auch zwei rechtwinklig gegeneinander stehende Kreuzschleifen-Sinusgetriebe zeichnen miteinander einen Kreis; das liegt klar vor Augen. Zwei Integratorstufen miteinander verkoppelt erzeugen eine Sinuslinie; je zwei davon liefern einen Kreis wie die Kurbeln, und auch das ist noch gut zu sehen und zu verstehen. Im elektronischen Analogrechner ist eine nachgebildete Kreisprobe wenig sinnfällig, lediglich im Schrieb zu sehen, nicht zu ‚begreifen‘, nur zu lernen. Dem Verständnis von zu lehrenden Sachverhalten dient am besten, wenn mechanische Demonstrationsgeräte auch von Hand in Aktion versetzt werden können.

A.1. Zeichengeräte, Rechen- und Funktionsgetriebe

Zu den analogen Geräten seien zuerst auch die einfachen mathematischen Hilfsgeräte und die Instrumente gezählt, die Funktionen und Operationen nachbilden und/oder aufzeichnen. Nicht zu vergessen seien die urtümlichen Beobachtungshilfen für sowohl astronomische Himmelserscheinungen wie Sonnenwendepunkte mittels Steinsetzungen, Visier- und Peilmarken bis hin zu den Observatoriumsbauten in Indien und des *Tycho Brahe*, als auch für terrestrische Vorgänge wie (Nil-) Wasserstände (Elefantine).

Es sei daran erinnert, dass ein früher sehr wesentlicher Bereich der mathematischen Wissenschaften die Geometrie nach *Pythagoras*, das zeichnerische Lösen „mit Zirkel und Lineal“ war; sie hat bewundernswerte Erkenntnisse erbracht, und noch in der Gotik bewiesen die kunstvoll ‚gezikelten‘ Maßwerke an Fenster und Altären, wie geläufig das Umgehen mit Zirkel und Lineal selbst den Steinmetzen von der Hand ging.

Das Lineal erhielt erst viel später beim Vordringen des numerischen Denkens eine Längenskala und wurde so zum Maßstab. Die gerade Linie wurde anfangs durch ein gespanntes Seil (bei größeren Feldarbeiten) realisiert; dieses Seil wurde auch durch Knoten in drei- sieben- und zwölfmal gleichen Abständen zum Abstecken von rechten Winkeln brauchbar.

A.1.1. Zeichengeräte

- Lineale und Maßstäbe mit Längenteilung, ggf. mit Feinablesung durch Nonius, oder mit Punktierspitze zum genauen Anstechen von Längen.
- Teilungsschieber zum Zeichnen von Skalen und Netzlinien in einstellbaren Abständen.
- Parallellineale mit Rollenführung.
- Winkelmesser („Transporteure“) zum Zeichnen und Messen von Winkeln mit 90°- /100°-Teilung. Hierzu gehören auch die nautischen Geräte zur Bestimmung der geographischen Breite durch Anpeilen und Messen von Gestirnsorten, insbes. des Sonnenhöhenwinkels, wie der Quadrant (Abb. 2) und der (von *Newton* erfundene) Spiegelsextant (Abb. 3), und die geodätischen (Nivellier-) Instrumente von der Wasserwaage bis zum Theodoliten [1].
- Zirkel zum Zeichnen von Kreisen.
- Ellipsenzirkel, vom Maschinenzeichner statt Näherungskonstruktionen verwendet, mit Gleitführung in Linealkreuz oder mit Zahnrad-Abrollung.
- Evolventenzeichner (Zeichnen von Zahnradflanken)
- Spiralenzeichner (z. B. Rolle auf Gewindespindel)
- Reduktions- / Stechzirkel zum Kopieren von Originalen in verändertem Maßstab und in Verbindung mit einem logarithmischen Maßstab zum Multiplizieren.
- Zeichenmaschinen mit Parallelführung der Lineale durch Gelenktrieb, Seilzug oder Schienenführung.

A.1.2. Koordinatographen zum genauen Aufzeichnen von Wertepaaren

- ‚Kartiergeräte‘ für ‚kartesische‘ Koordinaten mit zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Präzisionsmaßstäben und Gleitführungen.
- ‚Reduzierkartiergerät‘ (A. OTT) zum verzerrten Auftragen von Maßangaben auf unter Umständen in zwei Dimensionen unterschiedlich geschrumpftes Papier,
- für Polarkoordinaten mit schwenkbarem Maßstab und Winkelteilung oder Messrolle, oder im Vollkreis.
- Perspektiv-Zeichenmaschinen, die aus Grund- und Aufriss ein perspektivisches Bild zeichnen.

A.1.3. Pantographen (Storchenschnabel),

von *Christoph Scheiner* aus Ingolstadt 1603 erfunden, dienen dem Verkleinern oder Vergrößern von Vorlagen, z. B. dem Zusammenfügen von Messtischblättern zu Flurkarten. Sie wurden als einfaches Gelenkviereck gebaut, übers Papier gleitend, mit fest vorgegebenen Maßverhältnissen durch in Bohrungen einzusetzende Stifte, oder auch als frei schwebend an kranartigem Gestell aufgehängte Universal-Präzisionspantographen mit frei wählbaren Reduktionsverhältnissen. Neuerdings werden ‚Feldpantographen‘ mit langem Gestänge oder Seilzügen benutzt zum Aufzeichnen von archäologischen

Bodenmarkierungen auf Papier, auch an Personal-Computer angeschlossen zur Speicherung der Polarkoordinaten.

Stereopantographen (A. OTT) tasten Modelle in wählbarer Höhe ab und zeichnen Schichtlinien oder formen umgekehrt Modelle nach diesen.

A.1.4. Affinigraphen

sind Umzeichner, die eine der Koordinatenachsen einer Original-Zeichnung im Maßstab umwandeln und verzerrt zeichnen, um z. B. Schwingungsschriebe mit Kreisbogen-Ordinaten auf rechtwinklige oder auf eine zum Analysieren vorgegebene Länge umzuzeichnen.

Umwandler korrigieren zusätzlich nichtlineare Skalen, indem nicht nur konstante Maßstabsfaktoren, sondern auch Korrekturfunktionen z. B. durch Kurvenführung eingegeben werden.

Inversoren und andere spezielle Umzeichner dienen besonderen Zwecken der graphischen Auswertung, z. B. der konformen Abbildung.

Stereo-Zeichengeräte dienen der Photogrammetrie zum Zeichnen von Höhenschichtlinien nach zwei getrennt zweiäugig abgetasteten Luftbildern. Auch hier sind Entzerrungsgetriebe zum Ausgleich der Perspektive erforderlich [„Stereokartierer“ (WILD / Heerbrugg) 1963].

A.1.5. Kurvenlängen-Messgeräte („Kurvimeter“)

Bekannt: Messrädchen zum Nachfahren von Straßen auf Karten.

Kurvenmesser genauerer Art haben ggf. Fahrlupen mit Spiegelflächen, mit denen die Kurve stets genau in Tangentenrichtung nachgefahren wird und eine (Abb. 4) oder zwei Messrollen.

Momentenkurvimeter bestimmen neben der Länge auch statisches und Trägheitsmoment mittels zusätzlicher Messrollen-Planimeter.

A.1.6. Funktionsgetriebe

führen arithmetische Operationen aus [2]. Es ist fraglich, ob eine konstante Wandlung von z.B. Umlaufzahlen, etwa eines von einem Pendel oder anderem Schwinger regelbar gehemmten Ablaufs eines Gewichtes oder Federwerkes mittels fester Zahnradgetriebe – ob also eine Uhr als mathematisches Instrument bezeichnet werden darf? Sicherlich ist das aber berechtigt bei astronomischen Uhren mit einer Vielzahl von exakt berechneten Getrieben zur Darstellung der Umläufe von Planeten.

Zu nennen wären unter anderem:

- Addiergetriebe [3] in Form von
 - Hebel- /Gelenktrieben [4],
 - Zahnstangen und Gewindespindel-Kombinationen,
 - Zahnrad-Differentialgetrieben mit Kegel- oder Stirnrad-Planetengetrieben wie im Auto,
 - Seil-Rollen-Summatoren mit Stahlband oder feinen Ketten wurden z. B. in Gezeitenrechnern verwendet (Abb. 87).
- Multiplizier-Vorrichtungen
 - mit festem Faktor durch Zahnrad-Übersetzung ggf. auch einstellbar (Abb. 5),

- mit variablen Faktoren sind sie realisierbar nach dem Strahlensatz-Prinzip mit einem Schwenklineal, gebaut u. a. in der DGM IPM-OTT (Abb. 72), durch Reibradgetriebe aller Art, durch Kurven-Hyperbel-Körpern zum Abtasten.
- Gelenk- und Gleitführungen wurden als Potenzier-, Radizier-, Quadriergetriebe und Inversoren vor allem bei Potenzplanimetern verwendet, mit quadrierenden Elementen nach der Formel $(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4ab$ [5], als Summe dezimal /dual gestufter Zahnrad-Übersetzungen (im Graphomat / Zuse).
- Beim Integrieren kann eine Multiplikation durch die Summe zweier Teilintegrale ersetzt werden (Abb. 47).
- Logarithmier-Einrichtungen mit Kurvenschablonen.
- Trigonometrische Getriebe als
 - Sinus- und Cosinus-Triebe als Kreuzschleifen in Fourier-Überlagerern (Abb. 93)
 - Tangensführungen in Integratoren.

A.1.7. Kinematische Vorrichtungen

zum Nachbilden von Bewegungsformen von Gelenkvierecken und zum Zeichnen von Koppelkurven sind zum Beispiel für die Gestaltung und Bemessung von Greiferbewegungen im Maschinenbau (Verpackungsmaschinen) wichtig.

Guillochiermaschinen zum Zeichnen bzw. Gravieren der Linienfiguren auf Wertpapieren aller Art zur Fälschungs-Sicherung.

A.1.8. Logarithmische Rechenschieber und -vorrichtungen

- Rechenstäbe (seit *Oughtred* um 1622) dienten zum Multiplizieren, Dividieren, Potenzieren sowie zum Ablesen trigonometrischer und ggf. anderer Funktionswerte. Üblich war eine Skalenlänge von 25 cm, was Rechengenauigkeiten von 1 Promille erlaubte (Abb. 6,7,8).
- Rechenschieber
- Rechenwalzen mit vielen Skalen auf Mantellinien und Skalenlängen bis 12,5 m (0,02 Promille) (Abb. 9).
- Kreisrechenschieber von kleinsten Ringen um das Zifferblatt von Armbanduhren bis zu spiraligen Skalen mit 1 m Durchmesser.
- Bandförmige lange Skalen (10 m) motorisch auf- und abgewickelt von einer bzw. zwei verkoppelten Bandspulen.
- Walzenförmige drehbare, miteinander verkuppelbare Skalenträger beim ‚Drehrechner‘ mit 10 m Skalenlänge (auf 4,5 Ziffernstellen genau) (Abb. 10).

A.1.9. Netztafeln, Nomogramme und Nomographen

Kurventafeln als Rechenhilfsmittel wurden u. a. zur Darstellung der komplexen Zahlenebene (Abb. 11) benutzt und mit logarithmischer Skala in Form einer ‚Komplex Rechenwalze‘ entworfen (Abb. 12) [6].

Ebenso wurde das Problem der schritthaltenden Qualitätskontrolle mit einem Kurvennetz zur *Gaußschen* Häufigkeitsverteilung (Abb. 13) und einem Gerät zur automatischen Überwachung angegangen [7].

Nomogramme sind Skalentafeln, die mittels eines im Allgemeinen zwei gegebene Skalenwerte verbindenden Ablesestriches auf einer dritten Skala das Ergebnis anzeigen (Abb. 14). Sie wurden auch mit vielen Skalen (Abb. 15), mit Netztafeln (Abb. 16) und in

Gestalt von ‚Sonderrechenschiebern‘ für spezielle Aufgaben in vielerlei Varianten oft gebraucht [8].

Nomographen sind mechanisierte Nomogramme. Das älteste Gerät solcher Art ist das Navigations-Hilfs-Instrument aus etwa 83 v.Chr., das 1901 vor Antikythera geborgen und 1930 restauriert wurde. Es ist ein astronomisches Räderwerk mit Differentialgetrieben und vielen Ringskalen zur Anzeige der Sternorte wichtiger Gestirne zum manuell eingestellten Datum (Abb. 17) [9]. Im Mittelalter gab es häufig künstlerisch ausgeschmückte ‚Astrolabien‘ ebenfalls zur Darstellung der Gestirnsbahnen und -orte (Abb. 18). (Um die Kunstfertigkeit der damaligen Feinmechaniker recht zu würdigen, sollte man sich daran erinnern, dass alle Zahnräder einzeln von Hand gefeilt werden mussten!)

Im Zuge der Arbeitsrationalisierung um 1930 wurden diese Arbeitsmittel stark gefördert und breit benutzt. Es gab unter vielen anderem

- Spezial-Rechengeräte
- Sonderrechenschieber für die Berechnung von Schraubenfedern, einen
- ‚Ringbuch-Rechenschieber‘ (THIEL & WIDMAYER / Stuttgart, 1934) mit auswechselbaren Blättern zum Ablesen von Zahlenwerten für die Bemessung von Spulen, Motoren, Leitungen usw., einen
- Statistischen Sonderschieber mit Ablesekurven auf dem Läufer [10], und
- Nomographen-Geräte wie den ‚Schnellkalkulator‘ (BLOCH / Oberndorf, 1919) für die Spanabnahme bei Werkzeugmaschinen (Abb. 19).

A.2. Rechnende Spezialgeräte

Analoge Rechengeräte für eindeutig definierte spezielle Aufgaben wurden als Kombinationen der oben angeführten Funktionsgetriebe vorzugsweise für militärische Zwecke entwickelt und eingesetzt; es waren Feuerleit-, Richt- und Kommandogeräte. Damit wurden die Sollwerte der Einstellung eines Geschützes unter Berücksichtigung von Zielort, Windeinfluss, Treibladung usw. ermittelt, angezeigt oder besser direkt angesteuert. Dazu waren sowohl trigonometrische Funktionen und arithmetische Operationen im Spiel wie auch nur empirisch ermittelte Funktionen, die mit (u. U. mehreren) Kurvenkörpern (Abb. 20) realisiert wurden. Seit dem Mittelalter waren Schusstafeln für jede Art von Geschütz auszuarbeiten und im Feld zu benutzen; sie gaben für die Zielentfernung (und ggf. Höhenlage) die Menge der Treibladung und den Rohrerhöhungswinkel an. Die Feldartillerie konnte immerhin das Ergebnis beobachten und das Ziel eingabeln. Noch um 1940 gab die immense Arbeit, für immer neue Typen von Geschützen und Geschossen neue Schusstafeln zu berechnen und zu erproben, in den USA den Anstoß, erst analoge, dann digitale Rechenanlagen in Auftrag zu geben.

Schwieriger wurde es für die Schiffsartillerie, wo das Schlingern des Schiffes durch Kreiselstabilisierung auszugleichen war. 1910 wurde von SIEMENS & HALSKE erstmals ein Rechelement, ein *Gonella*-Trieb in ein Feuerleitgerät eingebaut. Torpedos erhielten eine Nachlauf-Ansteuerung des fahrenden Zieles; damit nicht das Boot insgesamt in Zielrichtung laufen musste, wurde eine Bogenführung nach dem Ausstoß eingesteuert.

Bei radargesteuerten Flugabwehrkanonen wurde die Aufgabe noch komplizierter, da oft unsichtbare und schnell bewegliche Ziele mit freier Beweglichkeit in drei Koordinaten auftraten, und nicht nur das Ziel erreicht, sondern auch der Zeitpunkt der Detonation des Geschosses errechnen werden musste. Auch Bombenabwurf- / Zielgeräte gehören hierher.

Diese Geräte enthielten eine Menge von hochentwickelten Rechenbaugruppen, aber deren Entwicklung war geheim; es gab keinen Austausch mehrfach brauchbarer Teilgeräte, keine rationelle Vereinheitlichung [1, 2, 3, 4].

Hersteller dieser hochentwickelten Feinmechanik waren in Deutschland u. a. die Firmen ASKANIA, SIEMENS & HALSKE bzw. deren Tochterfirmen SIEMENS APPARATE UND MASCHINEN GmbH SAM, GESELLSCHAFT FÜR ELEKTRISCHE APPARATE GELAP ab 1925 für Torpedoleitgeräte, OLAP/ Mailand, und CARL ZEISS / JENA.

Alle diese Geräte mussten sowohl sehr genau arbeiten wie auch äußerst stabil gebaut sein, um dem harten Einsatz im Krieg gewachsen zu sein. Der Autor erinnert sich, bei der FIRMA ZEISS / Jena von einem Marine-Richtgerät gehört zu haben, das trotz sorgfältiger Konstruktion häufig zur Reparatur zurückkam – und zwar, weil es im Schiff so befestigt war, dass es beim Rein-Schiff-Putzen als Trittstufe für Nagelstiefel dienen konnte.

Die Forderung nach unbedingter Betriebssicherheit auch unter rauesten Bedingungen führte dazu, dass rein mechanische Rechengetriebe verlangt und gebaut wurden. Erst als der große Bedarf an Geräten und das Fehlen von Fach-Feinmechanikern die Produktion, insbes. von Kurvenkörpern hoher Genauigkeit, verunmöglichten, versuchten die Lieferfirmen ab etwa 1942 und zuerst vergebens, auf elektrische Schaltungen auszuweichen, denn diese waren auch von Frauen herzustellen. Allerdings schreckte die hohe Zahl von noch recht unzuverlässigen und empfindlichen Röhren auch in den USA davon ab, Röhrenrechner als Zielgeräte einzusetzen.

A.3. Algebraische Gleichungen und Gleichungssysteme

Es ist für analoge Geräte kennzeichnend, dass sie vor allem für die Lösung bestimmter mathematischer Probleme von technisch-wissenschaftlichem Interesse gebaut oder wenigstens entworfen wurden. Universell einsetzbare Rechengeräte wie die programmierbaren Digital-Computer waren in analoger Bauweise nicht herzustellen. Zu diesen rechnerisch nur langwierig zu lösenden Problemen von großer Bedeutung für manche technische Entwicklung gehören auch algebraische Gleichungen, das sind Potenzreihen mit einer Unbekannten von der Form $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = 0$.

Analoge Geräte sind im Grunde Simulatoren; sie sind entweder physikalisch analog oder mathematisch, d. h. sie bilden ein der direkten Messung unzugängliches Problem in kleinerem Maßstab physikalisch nach, oder sie betrachten ein messtechnisch erfassbares System, das der gleichen mathematischen Formel gehorcht. Zu letzteren gehören diejenigen Geräte, die eine dem Rechnen schwer zugängliche Formel in ein apparatives Modell zwingen und dieses untersuchen; das sind u. a. die folgenden:

A.3.1. Geräte zum Lösen algebraischer Gleichungen

A.3.1.1. ‚Gleichungswaage‘ nach George B. Grant 1896

Dieses waageähnliche Gerät zum Auflösen einer algebraischen Gleichung bestand aus mehreren Waagebalken übereinander (Abb. 21) Sie waren jeweils durch eine Stange (Koppelstelle B) miteinander verbunden, und ihre Schneiden-Auflager waren durch Zahnrad- und Gewindespindeltrieb in ganzzahligem Verhältnis zueinander verschieblich [1]. Die Waagebalken trugen beidseits je eine Schale, in denen Gewichte proportional zu den Koeffizienten einzulegen waren, und zwar positive rechts, negative links. Die Verschiebung der Auflager durch Kurbeltrieb galt als unabhängige Veränderliche x . Bei Gleichgewicht im ganzen System galt $ax^n + bx^{n-1} + \dots + m = 0$.

Die Lösung x ließ sich dann am Zählwerk der Kurbel ablesen. Der Verfasser entwarf eine andere dem obigem Prinzip gehorchende Anordnung aber mit nebeneinander liegenden Waagebalken, wodurch die Verschiebung der Koppelstellen auch in negative Bereiche für x (links der Auflager) möglich wäre (Abb. 21). Ein Zählwerk für die Spindelverschiebung x und statt der aufzulegenden Gewichte je ein stetig verschiebliches Laufgewicht hätten das vorgeschlagene Gerät zweckdienlicher werden lassen.

A.3.1.2. Methode nach Rowning / Zemanek

John Rowning / London hatte schon 1768 eine apparative Lösungsmethode entwickelt, die auf *J.A. Segner* (1704-1777) zurückgeht und von *H. Zemanek* 1973 wiederentdeckt wurde [2]. Es betrifft ein in zwei Dimensionen verschiebliches Gestänge, bei dem das Verschieben in x -Richtung zwangsläufig die anderen angekoppelten Stangen in y -Richtung mitnimmt. Ein Gerät dieser Art zu bauen schien schon dem Erfinder schwierig, *Rowning* (bzw. sein Londoner Mechaniker) erreichte es immerhin für Gleichungen zweiten Grades.

A.3.2. Systeme linearer Gleichungen

Systeme von Gleichungen ersten Grades in Matrixform haben für den technischen Alltag eine große Bedeutung, z. B. bei der Konstruktion statisch unbestimmter Fachwerke. Sie sind rechnerisch nur durch Iterations-Verfahren mit langwieriger Arbeit zugänglich. *Prof. A. Walther* und die ‚Rechenfabrik‘ seines Instituts IPM brauchte um 1942 für die Auflösung eines Systems von 42 Gleichungen mit achtstelligen Koeffizienten für die damals projektierte Kuppel eines neuen Münchener Hauptbahnhofs mehrere Monate, zumal neun Varianten durchzurechnen waren. Es ist somit verständlich, dass immer wieder Geräte dazu entworfen und gebaut wurden, vorwiegend nach analogem Prinzip. Aber auch *K. Zuse* baute seinen ersten Rechenautomaten 1936 zur Lösung der ihn als Statiker belastenden Schemarechnungen.

A.3.2.1. Mechanisches Gerät nach J. B. Wilbur 1936 [3]

Die Koeffizienten wurden hier als Radius von auf schwenkbaren Hebeln einstellbaren Rollen eingebracht; ein Seil konstanter Länge lief über alle diese Rollen nach Art einer Kreuzschleife (Abb. 22), addierte also die jeweiligen Sinuswerte.

Auf den gleichen Hebeln, die als Platten ausgebildet waren, saßen auch die Rollen, mit denen die Koeffizienten der anderen Gleichungen als Radius eingestellt wurden, mit je einem Seilzug. Die zwangsläufige Verbindung zwischen den Seilzügen und den Platten-Schwenkwinkel bewirkte, dass bei Verschwenkung einer Platte alle weiteren Platten in eindeutiger Weise folgen mussten. Aus den Verhältnissen der Schwenkwinkel waren die Lösungswerte für das System zu errechnen.

Diese Maschine nach *Wilbur* war für bis zu 9 Gleichungen ausgelegt und hatte $9 + 1$ Platten und 10 Seilzüge.

A.3.2.2. Maschine zum Auflösen linearer Gleichungssysteme mit bis zu 10 Unbekannten von Ing. Josef Nowak [4]

Im Deutschen Museum ist ein Modell dieses Gerätes für ein System von 5 Gleichungen vorhanden (Abb. 23). Um 1911 soll eine Maschine für 10 Unbekannte in München von der Firma SEDELBAUER gebaut und 1915 beim Städtischen Elektrizitätswerk installiert worden sein. Es sollte dort die Belastungen im Leitungsnetz berechnen; jedoch schon das kleinere Modell war sehr schwergängig. Es ist ein Getriebe aus Zahnrädern, die in Spalten und Zeilen angeordnet und miteinander verbunden sind.

A.3.2.3. Maschine für Probleme der linearen Planungsrechnung

Für den praktisch wichtigen Sonderfall der optimalen Auslastung von Werkzeug- und anderen Produktionsmaschinen bzw. von Fertigungsstätten für unterschiedliche Aufträge, also für Probleme der linearen Planungsrechnung, wurde vom Autor 1962 ein ölhdraulisches Gerät vorgeschlagen [5] (Abb. 24).

Die grundlegenden Einstellwerte und die Ergebnisse werden als Verschiebungen von Kolben mit spalten- und zeilenweise verbundenen Ölzylindern dargestellt; die Eignung der Maschinen oder Anlagen für die Aufträge, die Koeffizienten im Gleichungssystem, werden durch Gewichtsbelastung der Kolben simuliert. Die bestgeeignete Produktionsmaschine, also die mit der geringsten Gewichtsbelastung, nimmt als erste den Auftrag an, sofern und soweit ihre freie Kapazität (durch Kolbenhub-Begrenzung definiert) das zulässt; dann folgen die schwerer belasteten Kolben mit der restlichen Produktionskapazität.

Ähnliche Geräte wurden in den USA patentiert [6], und von *David Frazier* (STANDARD OIL Co. / Cleveland) gebaut. Auch er verband Ölzylinder zeilenweise mit variablen Übersetzungen, die in beiden Richtungen wirksam waren, und spaltenweise in Bezug auf die Hübe der Kolben, an denen wie vor die von ihnen übernommenen Arbeitsmengen angezeigt wurden [7].

A.3.2.4. Harmonische Synthesatoren

Netzwerkprobleme wurden auch mit Harmonischen Synthesatoren bearbeitet; ein mechanischer Überlagerer mit je 15 sin- und cos- Kreuzschleifen und Summierung durch Kettenzug wurde so eingesetzt, dass die cos-Summen als Abszissenvorschub benutzt wurden. Somit wurde ein Ortskurvenbild aufgebaut, ähnlich so, wie die reellen und imaginären Wurzeln eines Polynoms im Bild dargestellt werden [8].

A.4. Differenziergeräte

Bei den graphischen und den instrumentellen Verfahren zum Differenzieren geht es darum, das Steigungsmaß dy/dx einer gezeichnet vorliegenden Kurve zu bestimmen, also in jedem Punkt den Steigungswinkel der Tangente auszumessen. Erfolgt das Punkt für Punkt, so ist dies ein statisches diskontinuierliches Verfahren. Es ist ein Erfahrungssatz der praktischen Mathematik: „Differenzieren raut auf“.

A.4.1. Messen des Steigungswinkels

Hilfsmittel zum Anlegen der Tangente und Messen des Steigungswinkels sind daher mit Sorgfalt zu benutzen:

- a) Spiegellineale sind in Richtung der Normalen so gut anzulegen, dass sich im Spiegel der Kurvenstrich ohne Knick fortsetzt. Diese Spiegelfläche kann auch im Inneren einer Kugellupe angeordnet sein. Das ist der Fall beim
- b) Derivimeter von A. OTT, bei dem die Lupe mit einem Winkelmesser verbunden ist. Das Gerät kann ggf. an die Linealklemme einer Zeichenmaschine eingesetzt werden.
- c) Der Prismenderivator nach von *Harbou* der FA. ASKANIA / Berlin benutzte ein Prisma, das nur, falls es in Tangentenrichtung angelegt ist, den Kurvenstrich ohne Sprung zeigt. Beide Prinzipien lassen sich auch vereinen [2].
- d) Slope Reader von GERBER SCIENTIFIC INSTRUMENTS (USA) benutzte ein Federstahlband, das dem Krümmungsverlauf der Kurve angepasst wird; dann sind Tangentenrichtung und Krümmungsradius an Teilungen abzulesen [1]

A.4.2. Stetig arbeitende Differenziergeräte

Auch stetig arbeitende Differenziergeräte wurden gebaut, doch ist wegen des eingangs erwähnten Effekts zum Aufräuen das Bedienen solcher Geräte recht schwierig: die Kurve muss mittels eines Fadenkreuzes oder eines Derivators stets in Tangentenrichtung befahren werden. Das Steigungsmaß steuert einen Integrator, dessen Ergebnis die Lage des Nachführ-Punktes steuert. Da dessen Parallelverschiebung keinen Einfluss auf die Tangentenrichtung hat, kann bei Abweichungen zwischen Fadenkreuz und Kurve dieses ggf. etwas verschoben werden. Nach diesem Prinzip arbeiten

- a) Differentiograph von A. OTT und der ähnliche
- b) Differentio-Integraph von *von Harbou* [2].

Beide Geräte lassen sich umgekehrt auch als Integraphen verwenden.

Das Prinzip der Kurvennachfolge in Tangentenrichtung hatte bei automatischen Kurvenabtastern Bedeutung, um diese nicht nur mit Knicken oder treppenartig nachfahren zu lassen sondern stetig und somit genauer sein zu lassen. Das wurde schon versucht bei ersten mathematischen Geräten [z. B. der DGM IPM-OTT; (Abb. 71)] und dann bei zeichnungsgesteuerten Werkzeug-, insbesondere Brennschneid-Maschinen und dergl. bis zur Einführung der digital-numerischen (Lochstreifen-) Computer-Programm-Steuerung.

A.4.3. Kugeldifferentiatoren

Nach dynamischem Prinzip für die Differentiation arbeiteten die Kugeldifferentiatoren; sie basierten auf dem Vergleich von Umfangsgeschwindigkeiten, wie es von *A. und J. Amsler* um 1900 erfunden war. Solche Geräte gehörten zur Ausrüstung der Dynamometerwagen sowie von Traktoren-Prüfständen und dergl. der Firma AMSLER. Hier wird eine Kugel durch zwei um 90° versetzte und mit zwei Drehgeschwindigkeiten v_1 (proportional y) bzw. v_2 (proportional x) angetriebene Rollen in eine also resultierende Drehung versetzt. Eine Schlepprolle mit geringem Radius, dessen Schwenkachse senkrecht auf der Ebene der beiden Antriebsrollen steht, ruht auf der Kugel. Sie stellt sich mit einer gewissen Einlaufzeit auf einen Schwenkwinkel ein, der dem \arctan des Verhältnisses der beiden Antriebs-Umfangs-Geschwindigkeiten proportional ist.

Je kleiner der Schleppenradius ist, umso schneller aber auch umso zittriger folgt die Einstellung einem sich verändernden Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten. Das Gerät eignet sich speziell zur Verwendung bei stetig laufenden Vorgängen [1, 2].

Bei Analogrechnern jeder Art wird das Differenzieren möglichst vermieden oder wenigstens durch sich ggf. dem Mathematiker bietende Umformung der Aufgabengleichung umgangen.

A.5. Integriergeräte

Unter Integriergeräten / Integratoren seien im Folgenden alle jene Vorrichtungen und Instrumente verstanden, die beim Nachfahren einer Funktionskurve oder auch beim vollen Umfahren einer geschlossenen Figur auf ihrer Umrandungslinie die Summe (bzw. bei kleinsten Schritten das Integral) der Produkte aus Länge mal Breite messen, anzeigen und ggf. auch aufzeichnen. Im einfachsten Fall handelt es sich darum, Flächeninhalte von unregelmäßig, krummlinig begrenzten Flächen zu ermitteln, was ja rein rechnerisch nicht möglich ist.

In der Feldmesskunst war das Ausmessen von Ackerflächen zwecks gerechter Besteuerung bzw. zur Neuzuteilung nach den jährlichen Nilüberschwemmungen seit altägyptischen Zeiten bedeutsam. Bis zur Erfindung des Planimeters musste man sich dabei

in der Art behelfen, die Flächen in kleinste regelmäßige Teile zu zerlegen, diese zu berechnen und zu addieren. Die stetige instrumentelle Integration wurde zum einem wichtig, als von *James Watt* um 1802 bei Dampfmaschinen das Indikatordiagramm aus Dampfdruck über Kolbenhub aufgezeichnet und die sich ergebende Fläche als Leistungsmaß gültig wurde. Zum anderen verlangte die wissenschaftliche Durchdringung der Konstruktionsarbeit das Ermitteln von statischen und höheren Momenten, um die Belastung und Bemessung von Maschinenteilen besser als nur intuitiv wie bisher aufeinander abstimmen zu können.

Unter dem Thema Integriergeräte ist im Folgenden zu behandeln:

- Bauelemente zum Integrieren, wie die anzeigende Planimeterrolle, das zeichnende Schneidenrad oder verschiedene Reibgetriebe.
- Hilfsverfahren und -geräte zum leichteren Zählen und Summieren von kleinen regelmäßig begrenzten Teilflächen.
- Planimeter zum Ausmessen von Flächen; sie verlangen im Allgemeinen ein volles Umfahren des Randes.
- Integrimeter zeigen beim Befahren einer Kurve für jeden gerade erreichten Punkt die zwischen ihr und der Abszissenachse / Null-Linie befindliche Fläche an, geben also den Wert des unbestimmten Integrals. Sie lassen sich auch als Planimeter verwenden.
- Integraphen zeichnen diese Integralkurve auf Papier.
- Mehrstufige Integratoren bestehen aus mindestens zwei hintereinander verkoppelten Integratoren, wobei das Ergebnis-Integral der ersten Stufe als Eingang der zweiten Stufe benutzt wird.
- Integrieranlagen für Differentialgleichungen aus mehreren Integratorstufen werden in A 7 gesondert behandelt.

A.5.1. Grund-Bauelemente

In den folgenden Abschnitten werden die als integrierende Mess- und Zeichenelemente dienenden Bauelemente beschrieben.

A.5.1.1. Integrier-, Mess- oder Planimeterrolle

Sie wurde 1814 von *Martin Hermann* erfunden in Form eines Rädchens, das achsial verschieblich auf der Mantellinie eines Kegels abrollte. 1824 entwickelte auch *Tito (von) Gonella* in Florenz ein solches Linear-Planimeter; nach ihm nannte man diesen Reibradtrieb *Gonella-Trieb*. 1830 erhielt *Johannes Oppikofer* / Bern eine Prämie von 1600 Franken für seine ähnliche Erfindung [2]. 1849 ließ *Caspar Wetli* / Zürich die Messrolle auf einer sich drehenden Scheibe laufen. Sie ist eine leicht drehbar (in Spitzen) gelagerte Rolle mit gehärtetem Rand und einer Skalenteilung (Abb. 26). Der Rand ist feinst und genau achsparallel geriffelt. Die Rolle läuft auf Papier und zeigt in ihrer Drehung als Skalenablesung bei einer beliebigen Bewegung nur den Anteil, der genau in der Ebene der Rolle verläuft; Schiebebewegungen parallel zur Achse werden nicht bemerkt. Die Umdrehung der Planimeterrolle wird durch die Skala und Nonius, volle Umdrehungen mittels einer Zählscheibe angezeigt. Seit etwa 1983 wird auch eine elektronisch impulsgesteuerte Zählung mit Nullstellung, Skalierfaktor und Kommaeinstellung gebaut, was direktes Ablesen in den entsprechenden Wertseinheiten mittels 6-stelliger LCD-Anzeige ermöglicht.

Die Genauigkeit der Messung mit der Planimeterrolle hängt außer vom sorgfältigen Umfahren der Kurve ab von der Glätte der Papierunterlage (normales, nicht geöltes oder Hochglanzpapier), und davon, dass der Rändelrand nicht verschmutzt oder rostig ist und das Gerät einwandfrei justiert blieb.

A.5.1.2. Schneidenrad oder ‚scharfe Rolle‘

Das Prinzip wurde von *Coriolis* 1836 und *B. Abdank-Abakanowicz* 1881 entwickelt [3] und in den Integraphen der Firmen AMSLER, ASKANIA und A. OTT zur Anwendung gebracht (Abb. 27).

Das Schneidenrad kann nur in Richtung seiner Ebene auf dem Papier abrollen, nicht jedoch quer zu seiner Schneide verschoben werden. Es lässt sich (auf seine Grundlinie bezogen) in beliebige Winkelstellungen (innerhalb des 1. und 4. Quadranten) verschwenken, und bildet so das ‚Steigungsdreieck‘ dy/dx beim graphischen Integrieren nach. Es (ebenso ein daneben angebrachter Stift) zeichnet somit beim Verschieben seiner Halterung in x-Richtung fortlaufend die Integralkurve. Die scharfe Rolle selbst oder ihre Unterlage muss dazu in Ordinateenrichtung y verschieblich gelagert sein.

Die Zeichengenauigkeit hängt außer von der exakten Fertigung und bleibenden Justierung ab vom Material der Unterlage: bei mehrfachem Befahren der gleichen Integralkurve kann sich die scharfe Rolle u. U. eine Spurrille in zu weiches Papier eindrücken und darin festfahren; zu glattes hartes Material setzt einem Querrutschen zu wenig Widerstand entgegen.

Das Prinzip der scharfen Rolle auf ebener Unterlage wurde auch abgeändert zur Rändelrolle auf weichrauer Walze als ‚Schraube veränderlicher Steigung‘ (Abb. 28), ebenfalls erfunden von *Bruno Abdank-Abakanowicz* [3], angewendet von *Udo Knorr* im Fahrdiagraphen (s. A.6.4).

A.5.1.3. Reibrad auf rotierendem Kegel oder rotierender Scheibe

Das Reibrad auf rotierendem Kegel oder rotierender Scheibe (Abb. 29), erfunden auch von *Caspar Wetli* / Zürich 1849 und *Joh. Martin* / Bayern, bzw. auf einer Kugelkalotte (*Amsler*, 1856) waren die Integrierelemente der ersten ‚Koordinaten-Planimeter‘. Auch hier tritt ein Gleiten des Rollenrandes ein, wenn es auf der ruhenden Unterlage achsial verschoben wird. Er erfährt also eine Abnutzung, die zu unrundem, ungenauem Abrollen führen kann. Dieses Reibrad- (*Gonella*-) Prinzip wurde bei den mechanischen Integrieranlagen nach *Vannevar Bush* (s. A.6.6) verwendet.

A.5.1.4. Kugel-Zylinder-Reibgetriebe

Kugel-Zylinder-Reibgetriebe und andere ähnliche Bauarten von Reibgetrieben mit stetig änderbarer Übersetzung wurden ebenfalls als Bauelemente zum Integrieren benutzt.

Die Kombination von rotierender Scheibe und mittels einer radial einzustellenden Kugel angetriebenem Messzylinder (*J. Thompson* 1876) sollte ein Gleiten und somit Reibung vermeiden (Abb. 31) und gute Genauigkeit erreichen lassen. Das Drehmoment ist allerdings gering, weil nur das Gewicht der Kugel zur Wirkung kommt.

Eine Variante dieses Prinzips wurde 1874 beim Harmonischen Analysator *Henrici-Coradi* (Abb. 51) verwendet, wo mattierte Glaskugeln auf einer Stahlwalze laufen und von Messrollen in variabler Winkellage gehalten werden, die auf ca. 1 % deren Drehungskomponenten abtasten und anzeigen.

A.5.1.5. Kugelkalotte/Zylinder

Der Wunsch, eine höhere Genauigkeit zu erhalten, lag dem Prinzip Kugelkalotte /Zylinder (Abb. 32) und anderen ähnlichen Bauweisen zu Grunde, bei denen die Bewegung in Abszissenrichtung durch kinematische oder Zahnrad-Übersetzungen auf das etwa Zehnfache vergrößert wurde. Geringe Ungenauigkeiten des Radius der Kalotte führten zu Messfehlern; im Drehpunkt musste wegen der Schleifwirkung ein gehärtetes Teil eingesetzt sein.

A.5.1.6. Kugelintegrator

In komplizierteren Zusammenstellungen war ein größeres Drehmoment der Messrolle erwünscht. Nach der Erfindung des Kugelintegrators durch *Hele Shaw* (1885) [4] und dessen Verwendung durch *A. und J. Amsler* hat sich vor allem *Theodor Erismann* / *AMSLER* mit der Theorie und der Konstruktion von verschiedensten Geräten ähnlicher Bauart befasst (Abb. 33).

Von ihm wurde eine Reihe von technisch hervorragend konstruierten Großgeräten gebaut, nämlich Rechengetriebe zur Addition, Integration, Inverse Integration, Derivation der ersten und zweiten Ableitung und zur Ermittlung von unbekannten Harmonischen in Schwingungsschrieben, SchwingungsfILTER, Nachlaufsteuerungen, stufenlos regelbare Leistungsgetriebe [5].

A.5.1.7. Kugel-Zylinder-Integrator

Der Kugel-Zylinder Integrator nach *Ford* (Abb. 34) hat zwischen rotierender Grundscheibe und Messzylinder zwei in einem Käfig übereinander gehaltene Kugeln.

Dieses Prinzip hat gegenüber dem einfachen *Gonella*-Prinzip den Vorteil, dass beim Verschieben in Ruhe kein Gleiten und daher auch keine Abnutzung auftritt. Die drei kraftübertragenden Berührungspunkte beider Kugeln liegen in einer Linie; daher kann zusätzlicher Druck zwischen Zylinder und Scheibe aufgebracht und so das abzugebende Drehmoment erhöht werden.

A.5.2. Hilfsverfahren und -geräte zur Flächenmessung

Der Flächeninhalt von ebenen unregelmäßig begrenzten Figuren lässt sich (außer in den Fällen mathematisch definierter Flächen wie Kreise, Rechtecke und dergl.) nur analog ermitteln.

In primitiver Weise geschieht das durch:

- a) Zerlegen in zahlenmäßig definierbare Teilflächen, wie Rechtecke oder kleine Quadrate und Auszählen dieser Flächenelemente (d. h. Digitalisieren): durch Aufzeichnen auf kariertes Papier oder Überdecken mit einem karierten Transparentblatt.
- b) Zerlegen in schmale Streifen und Addition dieser Längen, wozu auch Hilfsgeräte („Harfenplanimeter“ von *Oldendorp* u. a.) entworfen wurden, insbesondere für große Lederhäute auch mittels motorischer Mess- und Zählapparaturen.

Das „Lederplanimeter“ (Abb. 35) als spezielles Großflächen-Planimeter hat eine Vielzahl von eng nebeneinanderliegenden Klinken, die motorisch parallel zueinander über die Messfläche gezogen werden. Wenn sie vom Leder angehoben werden greifen sie in eine jeweils darüber angeordnete Kette ein und nehmen sie um die Streifenlänge mit; diese Längen werden (mit Differentialgetrieben oder dergl.) addiert und die Summe, d. h. die Gesamtfläche, angezeigt – umso genauer, je schmaler die Streifen sind.

Maßgeblich für die Genauigkeit der Vorgehen nach a) und b) ist vor allem der sorgsame Abgleich der restlichen „Zwickel“, die außer den abzählbaren Elementen am Rande bleiben.

- c) Ausschneiden der Figur aus Papier, Wiegen und Umrechnen mit dem Einheitsgewicht des Papiers.
- d) Unter den Geräten zum Ermitteln des Flächeninhaltes durch volles Umfahren der Umrandung, den eigentlichen Planimetern, gab es einfache Planimeter mit graphischer Wirkweise, die während des Umfahrens mit einem Fahrstift eine

Folgekurve spuren bzw. zeichnen, aus der ein dem gesuchten Flächeninhalt proportionales Element ermittelt werden kann:

da) Beil- oder Hatchet-Planimeter nach *Prytz* (1886) (Abb. 36).

Das Beilplanimeter ist einfach eine beidseits abgebogene Stange mit Fahrspitze einerseits und einer Schneide am Ende. Umfährt die Spitze eine Fläche, so spurt die Schneide eine Folgekurve, deren Anfangs- und Endpunkt um den Abstand auseinander liegen. Das Produkt aus Armlänge und Abstand gibt den Flächeninhalt mit etwa 1 % Genauigkeit.

db) Schleppe nach *Vietoris* mit Zeichenstift.

Sie ist nach ähnlichem Prinzip entworfen für spezielle iterative Lösungen.

dc) Schleppen mit einer oder zwei Schneiden oder auch mit zwei Messrollen auf einem Querarm, deren Messdifferenz der Fläche proportional ist.

Diese Modelle hatten geringe praktische Bedeutung, weil sie mit 0,4 % bis 1,2 % Fehler wenig genau waren; sie wurden durch die genaueren Planimeter mit Messrolle verdrängt.

A.5.3. Planimeter mit Messrolle (Planimeterrolle)

Es wurde 1814 erfunden von *Hermann* / München. In die Praxis eingeführt hat sich das Polarplanimeter, das 1854 von *Jakob Amsler* / Schaffhausen geschaffen wurde. Als Kompensations-Planimeter wurde es ab 1874 auch von CORADI / Zürich, GEBR. HAFF und MAHO / Pfronten, A. OTT / Kempten und anderen, auch in Japan, in beträchtlichen Stückzahlen gebaut (A.5.3.1.a).

A.5.3.1. Grundplanimeter

Grundplanimeter dienen zum Ermitteln der Fläche einer voll zu umfahrenen Figur; die Messrolle sitzt mit paralleler Achse fest am Fahrarm. Je nach der Art der Führung des Fahrarms mit der Planimeterrolle werden unterschieden:

a) Polarplanimeter.

Die Messrolle und der Fahrstift sitzen an einem sog. ‚Fahrarm‘, der durch ein Gelenk mit einem ‚Polarm‘ verbunden ist und von diesem auf einen Kreisbogen geführt wird (Abb. 37a, b).

Der Drehpunkt des Polararms, der ‚Pol‘, kann als ‚Nadelpol‘ mit einer Spitze im Papier sitzen oder als ‚Gewichtspol‘ mit einem Kugelzapfen in einem schweren Klotz drehbar gelagert sein. Die zu umfahrende Fläche kann ganz außerhalb des Poles liegen oder bei größeren Flächen den Pol umschließen; dann ist die Fläche des vom Polarm überstrichenen Grundkreises zum Messergebnis zu addieren (Abb. 39).

Der Polarm kann auch ersetzt werden durch eine Nut in Kreisform, in der ein Zapfen des Fahrarms läuft; dann lassen sich hindurch gesteckte massive Körper (z. B. der Bizeps) planimetrieren.

Polarplanimeter wurden seit 1894 durchweg zweckmäßig als Kompensationsplanimeter ausgeführt, mit losem Gelenk aus Kugelzapfen und -pfanne zwischen Pol- und Fahrarm; dadurch lassen sich Messungen mit Polarplanimeter spiegelbildlicher Anordnung (‚Ellenbogen rechts oder links‘) ausführen. Etwaige Fertigungsungenauigkeiten des Planimeters lassen sich durch Mittelbildung aus beiden Messungen ausgleichen.

Außerdem ist bei diesem Kugelgelenk – im Gegensatz zum alten Scharnier – ein Verklemmen und Schrägstellen nicht möglich, und es erlaubt – auseinandernehmbar – ein gutes Aufbewahren beider Teile.

Ferner ist die Messrolle in 100 Skalenstriche unterteilt, die im Allg. je 100 mm² bedeuten; ein Nonius ermöglicht das Ablesen von Zehnteln (10 mm²), eine Zählscheibe oder ein Zählwerk zählen volle Rollenumdrehungen (Abb. 38). Um 1985 wurden elektrische Zählwerke (GEBR. HAFF) angebaut („Digitalplanimeter“).

Das exakte Befahren der Umrandungslinie wird leichter, wenn statt des Fahrstiftes eine Fahrlupe mit kleiner Ringmarke vorgesehen ist. Kleine zitterige Abweichungen gleichen sich dabei weitgehend aus; höhere Fehler ergeben sich beim vermeintlich exakteren Führen des Fahrstiftes entlang einer Geraden mit einem Lineal. Fahrarm und Polarm sind vielfach in ihrer Länge fein einstellbar, um Maßstabsfaktor und Umfahrungsbereich an die jeweiligen Verhältnisse optimal anzupassen.

Die Messgenauigkeit ist bei sachgemäßem Einsatz, bewahrter Herstellgenauigkeit und sorgfältiger Umfahrung übrigens unabhängig von der Oberfläche des erstmals überstrichenen Zeichenpapiers.

Hersteller von Planimetern waren oder sind noch:

ARISTO Dennert & Pape / Hamburg-Altona

Gebr. Haff / Pfronten (Allgäu)

MAHO / Pfronten (Allgäu)

A. OTT / Kempten (Allgäu)

J. Amsler u. J. Amsler-Laffon & Sohn / Schaffhausen

Gottl. Coradi / Zürich

R. & A. Rost / Wien

Starke & Kammerer / Wien

Koizumi / Japan

Tamaya / Japan.

b) Linearplanimeter, vornehmlich für langgestreckte Figuren.

Der Leitpunkt des Fahrarms mit Messrolle und Fahrstift wird nicht im Kreisbogen, sondern auf einer Geraden geführt. Diese Geradföhrung kann erfolgen durch:

- ba) Nutlineal, auf das auch ein Papierstreifen geklebt ist, auf dem die Messrolle läuft; somit sind nur positive Ordinaten zu befahren: „Linearplanimeter“ (Abb. 40a), oder mit
- bb) Spurwagen, der seitlich auf einem Ausleger den Drehpol trägt und mit Rollen in der Nut des Lineals läuft, womit auch negative Flächenteile auszumessen sind (Abb. 40b).
- bc) Walzenführung, d. h. der Pol ist an einem Wagen angelenkt, der mittels schwerer Walzen nur streng gerade auf der Zeichnungsfläche laufen kann; sein Abszissenbereich ist daher unbegrenzt (Abb. 46).

Rollbandtische dienen der Auswertung von Diagramm-Registrierstreifen, die unter dem feststehenden Drehpunkt des Fahrarms hindurch gezogen werden.

c) Radialplanimeter für Kreisdiagramme.

Schreibende Messgeräte und Registrierinstrumente zeichnen vielfach die Messwerte in Kreisdiagrammen auf, wobei der Schreibstift entweder linear geführt ist und in Polarkoordinaten schreibt oder an einem Schwenkzeiger sitzt und Kreisbahnen als Ordinatenachsen im Diagramm hat (Abb. 41).

Beide Formen lassen sich mit einem Radialplanimeter auswerten, dessen Fahrarm mit einer geraden bzw. gekrümmten Nut in einem ins Zentrum des Kreisschriebes zu steckenden Zapfen geführt ist. Das Messergebnis ergibt nach Division durch das zugehörige

Argument-Intervall die ‚mittlere Höhe‘ des Diagramms; das Instrument ist genau genommen ein Integrimeter.

Die beiden ersten Typen von Grund-Normalplanimetern zum Messen von Flächen auf Plänen und Karten sowie Diagrammen und Registrierstreifen, wofür die in sich geschlossene Umrandungskurve einmal voll zu umfahren ist, waren und sind wohl noch recht verbreitet, da sie einfache, billige, zweckdienliche, langlebige und doch relativ preiswerte Instrumente waren.

A.5.3.2. Potenzplanimeter

Potenzplanimeter bilden das Integral über Potenzen der bei der Umfahrung eingebrachten Ordinatenwerte, bilden also z. B. mit

$n = 2$ das statische Flächenmoment,

$n = 3$ das achsiale Trägheitsmoment bezüglich einer Achse, auf die das Instrument auszurichten ist,

$n = 4$ das polare Trägheitsmoment,

$n = 1/2$ die Durchflussmenge aus Düsen,

$n = 3/2$ das gleiche aus Überfallwehren,

$n = -1$ gilt bei Fahrzeituntersuchungen.

Konstruktives Mittel dazu ist die Vervielfachung der Winkelstellung der Messrolle in Bezug auf die des Fahrarms. Das kann (nach *H. ADLER* / IPM, 1931) durch kinematische Gestänge (Abb. 42), durch Zahnradübersetzungen [7] oder durch Kurven als Nut- bzw. Nocken-Führungen bewirkt werden. Vielerlei Sonderausführungen, auch mit 3 und 4 Messrollen (Abb. 43 u. 44), dienten der gleichzeitigen Ermittlung der in der Konstruktionspraxis so wichtigen Flächenmomente.

A.5.3.3. Präzisionsplanimeter

Bei Planimetern gab es in Bezug auf die Genauigkeit des Messergebnisses mehrere Konstruktionsstufen:

- a) Die Normalausführung in handlicher Größe, d.h. bei Polarplanimetern etwa 25 cm Fahrarmlänge: 0,02 %.
- b) Linearplanimeter mit besonders langem Fahrarm für große Flächen (Felle): weniger genau.
- c) Pantographengestänge zur Vergrößerung kleinster Flächen, mit der Messrolle am Ausleger.
- d) Präzisionsplanimeter mit etwa zehnfach höherer Genauigkeit, weil die Messrolle auf einer speziell geeigneten Unterlage läuft, die mittels Zahnrädern eine meist 10 fach erhöhte Geschwindigkeit erhält. Die Noniuseinheit entspricht im Allg. 1 mm², die Genauigkeit steigt dadurch auf ca. 0,01 %. Diese Planimeter wurden zweckmäßigerweise in den Katasterämtern verwendet.

Es gab zwei Bauarten von Präzisionsplanimetern:

Scheibenpolar-Planimeter (Abb. 45) und Scheibenlinear-Planimeter mit Rollwagen- oder Linealführung, alle mit papierbeklebter und vom Polarm über eine Zahnrad-übersetzung angetriebener Scheibe.

Kugelrollplanimeter (AMSLER) mit Walzenführung, mit über Zahnräder von den Walzen angetriebener Kugelkalotte und am Fahrarm parallel angebrachtem und mitgeschwenktem Messzylinder (Abb. 46).

A.5.3.4. Produkt- und Stieltjesplanimeter

Sie integrieren das Produkt zweier Funktionen $u(x)$ $v(x)$, die also beide mit einem Fahrstift manuell abgefahren oder auch instrumentell eingegeben werden müssen. Das Produkt kann dabei

- a) mit einem kinematischen Getriebe gebildet werden oder
- b) dadurch, dass an Stelle der Funktion $v(x)$ deren Integral $V(x)$ eingeführt wird, das in einem vorgeschalteten Integrationsgang gebildet wird, also (Abb. 47):

$$\int u(x) \cdot v(x) dx = \int u(x) d \int v(x) dx = \int u(x) dV(x).$$

Multiplikation durch Integration zu ersetzen wird auch bei Integrieranlagen häufig als vorteilhaft ausgenutzt, so bei den Integrieranlagen ASKANIA und MINDEN (s. A.6.8.1 und A.6.8.3).

Zu a) Ein spezielles Produktgetriebe vor ein Planimeter zu schalten wurde nur selten in Geräteform realisiert, und die ausgeführten Geräte waren meist nur Einzelstücke, die für einen speziellen Bedarf entwickelt wurden.

Zu b) Der zweite Fall $\int u(x) dV(x)$ heißt Stieltjes-Integral. Es hat in manchen Fachgebieten, z. B. der Potentialtheorie, durchaus praktische Bedeutung. Die ‚Belegungsfunktion‘ $v(x)$ darf auch Singularitäten, Unstetigkeiten (z. B. Sprünge) aufweisen. Sie kann u. U., falls sie stetig ist, durch eine fest eingebaute Führung statt durch eine manuell zu befahrene Funktionskurve eingebracht werden. Das Prinzip kann durch geeignete Wahl der zweiten Führungskurve als Momentenplanimeter mit beliebigem Exponenten dienen.

Das Stieltjesplanimeter (Abb. 48) waren von *E. J. Nyström* um 1934 bei A. OTT aus der Grundform des Harmonischen Analysators Mader-Ott (Abb. 50) entwickelt worden dadurch, dass an Stelle der Zahnstange zum Verschwenken der sin/cos-Zahnräder ein Wagen aufgebracht wurde, der die jeweilige Belegungsfunktion $V(x)$ zum Nachfahren durch eine zweite Bedienungsperson aufgezeichnet trug [8].

E. Laurila hat 1939 bei A. OTT stattdessen eine Schablone aus einem entsprechend gebogenen Stahlband aufgebracht, womit Bedienung durch nur eine Person möglich war. Es gab noch weitere Konstruktionen, die jedoch nicht auf dem handelsüblichen Gerät von OTT basierten.

- c) Vektorintegratoren waren spezielle Geräte (von *Föttinger* u. a. entworfen, von ASKANIA / Berlin gebaut), um Strömungen in Potential-, Quell- und Wirbelfeldern zu bearbeiten [9].

Eine große Zahl von Instrumententypen zeigt, wie hoch der Bedarf an Hilfsmitteln zum Bearbeiten von streng rechnerisch schwer oder nicht lösbaren wissenschaftlichen Problemen war. Er war nur mit mechanisch-analogen Geräten zu decken, bevor kleine, universell programmierbare und erschwingliche Digitalcomputer zur Verfügung standen.

A.5.3.5. Harmonische Analysatoren

Periodische Funktionen (Schwingungskurven) lassen sich durch eine Summe von Sinuswellen bestimmbarer Amplituden, Phasenlage und ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz wiedergeben (Abb. 49). Auch nichtperiodische Funktionskurven lassen sich (nur innerhalb eines beliebigen Abschnittes) durch die Summenkurve der trigonometrischen Reihe nach Fourier ersetzen:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos x + a_2 \cdot \cos 2x + a_3 \cdot \cos 3x + \dots + \\ b_1 \cdot \sin x + b_2 \cdot \sin 2x + b_3 \cdot \sin 3x + \dots$$

Zur Bestimmung der konstanten Koeffizienten a_n und b_n der Teilschwingungen gibt es zahlenmäßige Vorschriften, vorbereitete Rechenblätter und Vordruck-Bücher [10];

vorzugsweise werden zum Ermitteln der ‚Fourierkoeffizienten‘ an Hand eines vorliegenden Kurvenblattes aber Geräte, sog. ‚Harmonische Analysatoren‘ benutzt.

Die Koeffizienten ergeben sich als Integral über dem Produkt aus Funktionsperiode und Sinus- / Cosinuswellen mit wachsenden Frequenzen $n\lambda$. Harmonische Analysatoren sind daher eine spezielle Bauart von Produkt- bzw. Stieltjes-Planimetern (s. A.5.3.4). Ihrer praktischen Bedeutung halber sind sie jedoch hier gesondert behandelt.

Das Produkt aus den jeweiligen Werten von Funktionsordinate und Winkelfunktionswert kann als Fläche aufgefasst und in zeichnerischen Verfahren ausgemessen oder mit einem Planimeter erfasst werden. Dazu dient eine kinematische Führung des Planimeter-Fahrarms, die laufend das Produkt während des Nachfahrens der Funktionskurve bildet. Es gibt:

a) Harmonischer Analysator ‚Mader-Ott‘

Er wurde schon 1909 von O. Mader entworfen [13] und damals von GEBR. STÄRZL / München gebaut; weiterentwickelt und ausgebaut von A. OTT / Kempten (Abb. 50).

Das Gerät besteht aus einem Grundrahmen, der in y-Richtung in einem Nutlineal verschieblich ist, und einem Lenker, welcher auf beliebige Periodenlängen von $x = 2,5 - 40$ cm einstellbar ist. Er ist auf diesem in y-Richtung laufendem Wagen gelagert und lenkt eine Zahnstange x -proportional aus. Auswechselbare Zahnräder für $n = 1 \dots 33$ werden von ihr jeweils n -mal je Periodenlänge gedreht und führen in um 90° versetzten Bohrungen die Fahrstifte je eines Planimeters; diese zeigen den Wert von a_n bzw. b_n an.

Die Grundaufführung gilt für je ein Koeffizientenpaar je Umfahrung; sie ist ausbaubar bis zu 6 Planimetern, d. h. für je 3 Oberwellen je Umfahrung.

Es war (in A.5.3.4) bereits erwähnt, dass der Analysator mit Zusatzeinrichtungen zur Bearbeitung von Stieljetintegralen hergerichtet werden kann. Der Analysator Mader-Ott dürfte der meistverwendete sein.

b) Analysator Henrici-Coradi

Entwickelt 1894 von O. Henrici und von der Fa. Coradi / Zürich gebaut (Abb. 51). Es beruht auf dem Prinzip der Kugelintegratoren; bis zu 3 mattiert geschliffene Glaskugeln liegen auf Walzen auf, die von den Laufrollen des in y-Richtung rollbaren Wagens ordatenproportional gedreht werden. An diesem Wagen ist eine Fahrlupe über die mit 40 cm konstante Periodenlänge verschieblich; mittels auswechselbarer Zahnräder werden drei Käfige für je zwei Messrollen n -mal je Periode geschwenkt.

Die um 90° versetzten Messrollen zeigen den sin- bzw. cos-Koeffizienten an. Eine Zahnrad-Übersetzung erlaubt das Einstellen auf $n = 1$ bis 50, sogar bis auf 150 durch Zusatzräder. Das Gerät war sehr genau; nachteilig war, dass die Kurvenperiode auf 40 cm festgelegt und also oftmals ein Umzeichnen erforderlich war.

c) Weitere Formen

Viele andere Analysator- Bauformen und -Vorschläge haben keine Bedeutung erlangt; zu erwähnen sind beispielsweise nur die Geräte von Lübke, von Walz, von Michelson-Stratton [12].

d) Gezeiten-Analysator

Für die Berechnung der Fourier-Koeffizienten der periodischen Ebbe / Flut-Gezeitenbewegung wurde von Prof. Rauschelbach vom Deutschen Hydrographischen Institut /Hamburg, wo auch die großen Gezeitenrechner (Abb.8) arbeiteten, ein spezieller Gezeiten-Analysator gebaut. Hier dienten je 31 einstellbare Kreuzschleifen-Getriebe als Sinus- / Cosinus-Geber und 62 mechanische Rechenmaschinen zur Multiplikation dieser

Werte mit den (samt Uhrzeit über Lochkarten eingelesenen) Beobachtungswerten der Wasserstände.

e) Hilfsgerät anhand grafischen Verfahrens

Wie den rechnerischen Verfahren mit Schema-Vordrucken liegt auch graphischen Verfahren zu Grunde, dass sie nicht den stetigen Kurvenverlauf in die Koeffizientenermittlung einbeziehen, sondern nur diskrete Ordinatenwerte der Kurve addieren. Auch ein Hilfsgerät dazu wurde patentiert.

Hier wird ein Schlitten in bestimmte, von den Perioden der Oberwellen abhängige Positionen gebracht, die jeweiligen Ordinaten mittels eines Drahtes additiv bzw. subtraktiv aneinandergesetzt und die resultierende Länge abgemessen.

Ein Geräte-Vorschlag [14] hatte vorgesehen, dass sich viele Kurbelschleifen-Sinusgetriebe nebeneinander, durch ein addierendes Hebelsystem angetrieben, beim Nachfahren der Kurvenperiode selbsttätig auf die Oberwellen einstellen. Auch hier war die Periodenlänge fest vorgegeben. Das Gerät sollte auch zum kontrollierenden Zeichnen der Summenkurve dienen, also als **Synthesator**.

A.5.4. Integrimeter

Integrimeter dienen zum Ermitteln des unbestimmten Integrals einer Kurve, d. h. sie zeigen beim Nachfahren der Kurve an jedem Punkt den bislang überstrichenen Flächeninhalt zwischen Kurve und Abszissenachse; sie sind sozusagen Vermittler zwischen Planimeter und Integrator. Tatsächlich waren einige der älteren Bauarten von Linearplanimetern de facto Integrimeter, ebenso das Radialplanimeter. Durch geeignete, etwas umständliche Handhabung eines Planimeters lassen sich auch die Integralordinaten schrittweise ablesen.

Auch bei Integrimetern gibt es neben einer Grundform für das Integral der Funktionskurve noch Potenz-Integrimeter für Wurzel und Quadrat der Funktion und Kehrwert-Integrimeter, z. B. zur Bestimmung der mittleren Reisegeschwindigkeit aus dem Fahrgeschwindigkeitsdiagramm längs des Weges.

Konstruktive Mittel dafür sind auch hier Schleifkurbel- oder Nut-Kurventriebe, die den Arbeitswinkel der Messrolle entsprechend halbieren oder verdoppeln.

Die meisten Geräte sind **Linear-Integrimeter**. Sie sind auf einer Nutschiene geführt; die Messrolle läuft auf dem Lineal, das mit Papier beklebt ist (Abb. 52). Als Lenkgetriebe dient ein gleichschenkliger Schubkurbeltrieb, die Messrollenachse ist parallel zum Lenker. Negative Ordinaten lassen sich einbringen, indem man sie ins positive umklappt und rückwärts befährt.

Es gab ferner **Radial-Integrimeter**; sie dienten zum Auswerten von Scheiben-Diagrammen; falls die Ordinaten nicht radial streichen, wurde das konstruktiv berücksichtigt (Abb. 41).

A.5.5. Integrappen

Integrappen zeichnen zu einer vorliegenden Funktionskurve die Integralkurve auf. Dazu wird die jeweils abgetastete Ordinate als Integrand y' in einen Integriermechanismus eingebracht, der den Schreibstift die Integralkurve y zeichnen lässt. Praktische Bedeutung hatten vor allem die Integrappen nach dem Prinzip der ‚scharfen Rolle‘, das den Ordinatenwert als ‚Steigungsmaß‘ der Tangente der Integralkurve bewertet, also die scharfe Rolle (mit einstellbarem Polabstand des Steigungsdreiecks) bei Verschiebung des Gerätes in x-Richtung diese zeichnen lässt (Abb. 27).

- a) Dabei kann die scharfe Rolle in Ordinatenrichtung über das Papier beweglich sein (so bei den Integrappen von und ABDANK-CORADI) und die Integralkurve auf das gleiche Zeichenblatt zeichnen. AMSLER ließ zwecks größerer Leitkraft zwei parallele scharfe Rollen über das Papier laufen. AMSLER / Zürich führte die Rolle nach dem von *Abdank* angegebenen Prinzip durch ein Parallelogramm-Gestänge in Tangentenrichtung; sie wanderte mitsamt dem Zeichenstift über das festliegende Papier (Abb. 53). Wenn die scharfe Rolle um 90° geschwenkt eingebaut ist, wird das Gerät ein Kehrwert-Integrapph.
- b) Der weitest verbreitete Integrapph ADLER/OTT (Abb. 54) wurde 1930 von *H. Adler* (IPM) entworfen. Bei diesem wird die scharfe Rolle mit dem Grundrahmen in x-Richtung verschoben, läuft aber auf einem leichten in y-Richtung verschieblichen Wagen und spurt dort die Ergebniskurve. Auf zwei Nutschienen laufen der Grundrahmen mit der scharfen Rolle am Tangentenlineal und dem Schreibstift (hinten), sowie der leichte Papierwagen. Ein auf dem Grundgerät in y-Richtung laufender Wagen trägt vorn den Fahrstift und greift hinten mit einem Zapfen bei einstellbarem (50 - 200 mm) Polabstand in die Nut des Tangentenlineals ein. Beide Kurvenblätter sind auf das Format DIN A4 begrenzt.
- c) Ein Integrapph mit stufenlosem Reibgetriebe als Integrator wurde von der Firma AMSLER gebaut (Abb. 55). Das Instrument fährt auf einer Nutschiene in x-Richtung; ein Fahrstift (vorne) gibt den Integranden auf den Integrator, der den Zeichenstift (hinten) jenseits des Nutlineals antreibt.

Neben diesen Grundintegrappen zur Lösung des unbestimmten Integrals bzw. der Differentialgleichung erster Ordnung und ersten Grades wurden mehrere andere Konstruktionen erdacht, z. B.

- Produktintegrappen, die zwei einzugebende Funktionswerte erst multiplizierten und dann integrierten. Vannevar Bush baute in den zwanziger Jahren einen Produkt-Integrappen mit 2 Reibrad-Integratoren, der das Produkt beider Eingabe-Funktionen $g(x)$ und $h(x)$ ersetzte durch zwei parallellaufende Integrationen der Integranden $h(x) \cdot dg(x)$ und $g(x) \cdot dh(x)$ und Addition beider Integralergebnisse (s. A.5.3.4).
- Polarintegrappen wurden für Kreisdiagramme entworfen.
- Funktionsintegrappen sollten durch Variation des Anstellwinkels der scharfen Rolle, eines veränderlichen Polabstands oder mit gekrümmten Führungen spezielle Differentialgleichungen lösen. Solche Konstruktionen wurden selten realisiert und benutzt.

Praktische Verwendung gefunden hat allein der Fahrdiagraph von *Tuschy* zur Ermittlung des Zeit-Weg-Diagramms aus der Beschleunigung (Zugkraft) eines Fahrzeugs, d. h. insbes. zur Fahrplangestaltung [17].

Im Geschwindigkeits- / Weg-Diagramm ist die Subnormale der Beschleunigung proportional; wird also die scharfe Rolle quer zum Lenker angebracht (Abb. 56), der nach dem Wert der Zugkraft ausgelenkt wird, so zeichnet sie die $v(s)$ -Kurve. Zur Zugkraft kommt im Allg. noch der Einfluss des Fahrwiderstandes, d. h. des Streckenprofils hinzu; da dieses meist streckenweise konstant ist, braucht ihre Komponente nur abschnittsweise geändert zu werden; daher genügt eine Bedienungskraft.

Soll sie stetig veränderbar sein, muss ein zweiter Fahrstift bedient werden. Diese Abwandlung des von *Tuschy* angegebenen Prinzips wurde von *de Beauclair* [18] entworfen und von A. OTT gebaut (Abb. 57).

Die gezeichnete $v(s)$ -Kurve kann durch Anbau eines Kehrwert-Integrimeters zur Ermittlung der Fahrzeit dienen; *Tuschy* benutzte einen Kegel-Reibrad-Trieb mit Zeitskala und elektrischer Kontaktgabe zum Aufleuchten einer Lampe im Minutentakt.

Sämtliche bisher besprochenen Integratoren besaßen einen einzigen Integriermechanismus. Hintereinanderschaltung zweier und mehrerer Integrations-Stufen wird unter A.5.6 Mehrstufige Integratoren und A.6 gesondert besprochen; dazu gehören auch weitere Geräte zur Fahrzeitermittlung.

A.5.6. Mehrstufige Integratoren

Durch Hintereinanderschalten zweier oder auch mehrerer Integratoren lassen sich mehrfache Integrale bearbeiten; häufigster Anwendungsfall ist die Zweifach-Integration, um z. B. aus der Beschleunigung die Geschwindigkeit und aus dieser den Weg zu erhalten. Bei solchen gut definierten Aufgaben können die beiden Stufen fest verkoppelt sein. Beispiele hierfür sind

A.5.6.1. Autokorrelator

Der ‚Autokorrelator‘ 674 der Fa. AMSLER-LAFFON & SOHN / Schaffhausen (1955) (Abb. 58), eine Anlage mit Kugelkalotten-Integratoren (Abb. 33), ist vornehmlich ein Produktintegrator für zwei Ordinatenwerte einer Funktion an zwei unterschiedlichen Argumentstellen der lichtelektrisch abgetasteten Kurven. Die Integration des Produktes wird dabei ersetzt durch zwei Integrationen, was bei kleinen Werten auch genauere Ergebnisse liefert (Abb. 47).

Ferner lässt sich der Autokorrelator auch benutzen zur Ermittlung von Flächenintegralen, statischen Momenten und dgl., sowie zur Kreuzkorrelation, indem zwei verschiedene Funktionskurven abgetastet werden, und zur Harmonischen Analyse, wenn die zweite Funktion eine Sinuswelle ist.

A.5.6.2. Eisenbahn-Zugkraft-Messwagen

Wird zwischen Lokomotive und angehängten Wagen in der Kupplung ein Zugkraftmesser eingebaut, so kann bei bekannter Masse der Wagen und gemäß dem wegabhängigen Streckenprofil (Steigung) die von der Lokomotive geleistete Arbeit ermittelt werden (was bei Dampflokomotiven über den Kohlenverbrauch kaum möglich ist). Umgekehrt kann bei Elektroloks aus dem leicht zu messenden Stromverbrauch, d. h. der Zugkraft, auf das Streckenprofil geschlossen werden. Die Genauigkeit der hierzu eingebauten Integrationsgeräte war bereits in den dreißiger Jahren ausgezeichnet [19].

Der wissenschaftliche Leiter der Fa. A. OTT, *Dr. Ludwig Ott*, berichtete dem Verfasser um 1941 folgende Tatsache: Die spanische Staatsbahn wünschte vor dem Kauf eines mit Geräten der Fa. A. OTT / Kempten ausgerüsteten Messwagens deren Präzision nachgewiesen zu sehen. Eine Prüffahrt über eine bestimmte Strecke mit vorliegendem Streckenprofil schien aber Ungenauigkeiten der Messergebnisse zu erweisen. *Dr. L. Ott* verlangte ein Nachmessen des Profils; es ergab sich, dass seinerzeit beim Bau der Bahnstrecke der Bauunternehmer das geforderte und archivierte Profil nicht eingehalten hatte, sondern zum Einsparen von Arbeit und Material und für höheren Gewinn die Strecke in Tälern tiefer, über Berge höher als vorgeschrieben ausgeführt hatte.

A.5.6.3. ‚Brennschlussgerät‘ der Fa. A. OTT zur Rakete V 2 (Abb. 59)

Hier waren je zwei doppelwirkende (Abb. 77) Reibrollen-Integratorstufen fest hintereinander und über Summentriebe verkoppelt, um die in zwei Koordinaten auf Kreisel-stabilisierten Plattformen als Auslenkung der Feder-gestützten Massen gemessenen Beschleunigungskräfte zum zurückgelegten Weg zu integrieren. Mit einstellbaren Anfangs-Koeffizienten und dem nach letzten meteorologischen Aussagen (betr. Luftfeuchtigkeit, Windstärke und -richtung, Temperatur und vielen mehr) bestimmten Endwert der Flugparabel zum Erreichen des geforderten Zieles wurde das Abschalten des Triebwerkes

gesteuert. Dieses Brennschlussgerät war ein Spitzenerzeugnis feinmechanischer Konstruktion und Präzision. Es war von außen in keiner Weise mehr beeinflussbar. Es wurde aber auch zum Schlussignal für die Entwicklung mathematischer Instrumente bei A. OTT.

Es ist bemerkenswert, dass zuvor von der Versuchsstelle Peenemünde mehrere rein elektrische Funk-Verfahren („Ein- und Zwei-Quarz-Zeitmessung“) versucht wurden, wobei auf Grund des Dopplereffektes zwischen einer gesendeten und der zurück empfangenen Frequenz die Steiggeschwindigkeit ermittelt wurde, die auch maßgeblich für das Erreichen des Zieles war. Das Brennschlussignal wurde dann auch per Funk übertragen.

Vermutlich war die Anfälligkeit gegen atmosphärische und feindliche Störungen dieser Funkverfahren ausschlaggebend dafür, sichere rein intern-mechanische Methoden zu bevorzugen. Dazu sollte erst mit einer einstufigen Integration die von einem Kreisel aufgrund der Beschleunigung ausgeführte Präzessionsdrehung ausgewertet werden, um die Flug- (Steig-) Geschwindigkeit zu erhalten und beim Erreichen eines vorbestimmten Wertes den Antriebsschub erst zu drosseln und dann abzuschalten [20]. Die dann von A. OTT gebaute zweistufige Integration zum Flugweg (-höhe) scheint den Ansprüchen der Versuchsstelle Peenemünde an Genauigkeit und Störsicherheit absolut entsprochen zu haben.

A.5.6.4. ‚Ballistische Integrappen‘

‚Ballistische Integrappen‘ wurden ferner u. a. um 1942 von *Chr. Hamann* / DETEWE Berlin und um 1956 von der Fa. AMSLER / Schaffhausen für die spanische Marine entwickelt (s. A.6.8.4).

A.6. Anlagen zur Lösung von Differentialgleichungen (DGM)

Es handelt sich hier um Integrieranlagen, die mit anderen Operations- und Funktionstrieben zusammengeschaltet werden können, aber stets unter dem Prinzip der negativen Rückkopplung des Integrationsergebnisses auf den Eingang (s. A.6.1). Diese Anlagen sind sozusagen ein beobachtbares Modell, eine Simulation der durch die Differentialgleichung unrealistisch beschriebenen physikalisch-körperlichen Vorgänge, wo sich ja auch die Kräfte, Lagen und Wege allesamt gleichzeitig miteinander verändern.

Für jede Operation, die in der grundlegenden Gleichung auftritt, muss ein eigenes Rechengetriebe vorhanden sein, und alle müssen gleichzeitig parallel miteinander arbeiten vom Anfangszustand an bis zum vorgegebenen Maximalargument. Diese unabhängige Veränderliche kann die Zeit abbilden oder auch beliebig andere Größen darstellen.

Bei eigentlichen ‚Differentialgleichungsmaschinen‘ (DGM), also mechanischen ‚Analogrechnern‘ bzw. ‚Integrieranlagen‘, ist zusätzliche Forderung, dass dieses Zusammenschalten variabel, d. h. für jeden Anwendungsfall programmierbar ist. Die vorgesehenen Einzelgeräte der ersten von *Vannevar Bush* am Massachusetts Institute of Technology MIT / USA entworfenen rein mechanischen ‚differential analyzer‘ waren mittels Wellen und Zahnradkupplungen zusammenzuschalten, was engen und starren Aufbau und schwieriges Adaptieren mit sich brachte.

Spätere Nachbauten und Weiterentwicklungen sowohl von *Vannevar Bush* selbst wie anderenorts benutzten zur Verkopplung elektrische Übertragungssysteme und also flexible und an einer Programmtafel beliebig steckbare Drahtleitungen.

Solche Integrieranlagen waren für viele Probleme praktischer Konstruktionsarbeit sehr dringend gefragt, weil die rein mathematische Berechnung mittels iterativer Schemaverfahren (nach z. B. *Runge-Kutta*) mühselig, zeitraubend und anfällig für Arbeitsfehler war [1].

A.6.1. Das Prinzip der Rückkopplung

Der englische Wissenschaftler *Lord Kelvin* (*Sir William Thomson*) entdeckte bei der Beschäftigung mit dem von seinem Bruder *J. Thomson* entworfenen Kugeltrieb als Integrator und als Bauglied eines Harmonischen Analysators, dass eine zwangsläufige negative Rückführung vom Ergebnis y des zweiten Integrators zum Integranden-Eingang y'' der ersten Stufe die Differentialgleichung $y'' + f(y') + g(x) = 0$ direkt nachbildet. Er schrieb darüber wörtlich: „...it seems to be very remarkable that the general equation of the second order with variable coefficients may be rigorously, continuously, and in a single process solved by a machine.“ [zitiert aus 2].

Aus einer Hintereinanderschaltung von mehreren Integrierstufen wird ein Differentialanalysator, wenn das Prinzip der negativen Rückkopplung, des ‚feed back‘ $y'' = -y$ eingebracht wird.

Ein mechanisches Denkmodell dazu (Abb. 60) zeigt die negative Rückführung durch ein Zahnstangenpaar mit zwischenliegendem fest gelagertem Zahnrad. Bei richtiger Wahl der Anfangsbedingungen $y'' = 0$ und $y' = 1$ wird durch die negative Rückkopplung $y'' = -y$ die Differentialgleichung der Sinusfunktion nachgebildet und als Ergebnis die Sinuslinie $y = \sin x$ aufgezeichnet.

Dieses ausschlaggebende Prinzip unterscheidet diese Anlagen von den bisher unter (A.5.6) behandelten mehrstufigen Integratoren.

Lord Kelvin selbst hat seine Entdeckung theoretisch weiter bedacht, sie aber nicht in ‚Hardware‘ umgesetzt, kein Gerät gebaut [3]. Der erste, der einen zweistufigen Integrator mit Rückkopplung baute, war ab 1914 *Udo Knorr* / München (A.6.4) mit seinem ‚Fahrdiagrammen‘. 1931 baute *Vannevar Bush* (1890-1974) seinen ersten mehrstufigen mechanischen ‚Differential Analyzer‘ (A.6.6). Ihm folgten von 1935 bis 1952 circa 16 Nachbauten in USA und auch in Europa (Oslo) und Deutschland (s. C.3) [5 Seite 667].

Das waren die ersten großen Analogrechner; sie haben die mathematische Behandlung von vielen dringenden Forschungs- und Entwicklungsproblemen der Technik ermöglicht, welche durch Differentialgleichungen zu beschreiben, aber anders nur langwierig zu lösen sind.

A.6.2. Darstellungssymbolik der Zusammenschaltung

Das Zusammenschalten der Baugruppen der mechanischen Integrieranlagen entsprach einer Programmierung; es war im Voraus zu bedenken und zeichnerisch durch eine Symbolik festzulegen.

Zuerst waren, wie erwähnt, zur Fortleitung der Teilergebnisse Wellen und Querwellen mittels Kegelrad-Kupplungen benutzt worden. Die Symbolik nach *V. Bush* lehnte sich eng daran an: Die Piktogramme für die Einzelgeräte wie Integratoren und Addierer gaben deren Wirkungsweise wieder, die parallelen Linien für die Längswellen und die Querwellen wurden mit symbolischen Kupplungen verbunden (Abb. 61a).

Diese Zeichnung gab den realen räumlichen Aufbau der Integrieranlage wieder. Zum Einrichten waren Schraubendreher und Handwerkskunst nötig. Sobald elektrische Drehfeld-Übertragungssysteme und flexible Leitungen zum Zusammenschalten benutzt wurden, wurde die Symbolik abstrakter (Abb. 61b).

Rolf Engel zeichnete für einen Integrator ein Dreieck mit zwei Eingangspfeilen für den Integrand y' und die unabhängige Veränderliche t oder x , und einem Ausgangspfeil für das Integral y . So wurde es auch in den USA üblich (Abb. 61b). Auch eine an die Zeichen der Logik angepasste Symbolik wurde verwendet (Abb. 61c).

Neben dem Zusammenbau oder -stecken der Verbindungen zwischen den Baugruppen war noch das Einrichten der Anfangsbedingungen und der Maßstabsfaktoren notwendig, d. h. der Zahnradübersetzungen in der Verkopplung der Wellen (bei *Bush*) bzw. der Polabstände (bei Anlagen mit scharfer Rolle im Steigungsdreieck). Damit mussten sowohl die Faktoren und die Vorzeichen in der Gleichung berücksichtigt werden wie auch die verfügbaren Abmessungen der Geräte und Zeichenflächen. Das war eine nicht ganz unerhebliche Arbeit, die zwei bis drei Tage in Anspruch nehmen konnte. Endschalter in allen Geräten sorgten jedoch dafür, dass bei irrtümlichem Überschreiten der Grenzwerte kein Gerät zu Schaden kam. Da es sich jedoch in den meisten Fällen bei den Anwendungen um oft wiederholtes Durchspielen einer Aufgabe nur mit leicht geänderten Anfangswerten handelte, war dann der Ablauf ohne große Neuberechnung der Einstellungen möglich.

Das Aufzeichnen einer Lösungskurve dauerte um die 10 Minuten; das war um ein Vielfaches schneller als bei dem manuellen Durchrechnen iterativer Schemaverfahren mit Rechenmaschinen.

A.6.3. Verfahren zur Genauigkeitsprüfung

Werden zwei solcher in der Abbildung 60 schematisch dargestellter Zweistufen-Integratoren im rechten Winkel gegeneinander gestellt und der Zeichenstift von ihnen in beiden Koordinatenrichtungen bewegt, so zeichnet sich ein Kreis auf; ebenso, wenn einer den Zeichenstift bewegt, der zweite das Papier rechtwinklig dazu und ebenso, wenn y über y' aufgezeichnet wird. Die Konstanz bzw. Strichbreite des Kreises bei laufendem Argument ist eine gute Demonstration der Genauigkeit der Mechanik.

Der große Nachbau des Differential Analyzers von *Bush* an der Universität Oslo durch *Svein Rosseland* ergab bei einer Besichtigung im Herbst 1940 mit *Prof. Walther* u. a. folgende hervorragende Arbeitsgenauigkeit:

für $r = 175$ mm wurde bei zehnmaliger Wiederholung ein exakter Kreis mit der Strichbreite von 0,05 mm gezeichnet, das sind 0,03 % des Soll-Radius.

Die Anlage der Fa. ASKANIA (s. A.6.8.1) erreichte 1942 0,01 %.

A.6.4. Fahrgraph von *Udo Knorr*: die erste Integrieranlage

Udo Knorr entwickelte den ‚Fahrgraphen‘ insbesondere zum Aufzeichnen der zeitabhängigen Geschwindigkeits- und Weg-Kurven zur Ermittlung der Fahrzeiten von Zügen als Grundlage zur Aufstellung der Fahrpläne. Das wurde besonders dringlich bei Einführung der Elektrolokomotiven mit viel höheren Leistungen.

Die Beschleunigung $y'' = f(y') + g(y) + h(x)$ ist abhängig vom wegabhängigen Streckenwiderstand $g(y)$ aus dem vorgegebenen Streckenprofil mit Steigungen und Gefällen $h(x)$, sowie der Zugkraft der Lokomotive (abzüglich dem Fahrwiderstand des Zuges) abhängig von der Geschwindigkeit, die durch das Diagramm $f(y')$ eingeführt wird.

Der Ingenieur *Udo Knorr* in München entwarf das Gerät ab 1914 [4] und schrieb 1921 darüber seine Dissertation [5]. Das Gerät wurde von der Münchener Firma GEBR. STÄRZL in drei Exemplaren gebaut und war bis etwa 1929 in Betrieb beim Eisenbahnbetriebswerk München-Freimann [6] (Abb. 62a, b).

Bei einer Vorführung dort noch 1938 durch *Udo Knorr* wurde dem Autor die gute Brauchbarkeit von Amts wegen bestätigt; doch war bei der Fa. STÄRZL keine Konstruktionszeichnung mehr vorhanden, nach der etwa eine erneute Herstellung für *Prof. A. Walther* / IPM hätte erfolgen können.

Als Integratoren dienen hier ‚Schrauben veränderlicher Steigung‘ (s. A.5.1.2); in Tangentenrichtung eingeschwenkte Rändelrädchen laufen auf achsial verschieblichen,

x-proportional rotierenden Walzen, die mit weichrauem Belag (Leinwand oder Filztuch) ummantelt sind, und verschieben sie je nach ihrem Schwenkwinkel mehr oder weniger achsial auf ihrer Nutwelle. So werden gute Mitnahmekräfte erreicht. Eine Drehmomentverstärkung ist nicht erforderlich. Der jedoch so unvermeidbare Schlupf wird durch eine magnetische Kompensationseinrichtung im Tangentenlineal ausgeglichen; sie gibt diesem eine je nach Laufrichtung gegebenenfalls unterschiedliche zusätzliche Schrägstellung.

Manuell nachzuführen sind die vorgegebenen Kurven des Steigungswiderstandes als Funktion des Weges, d. h. das Streckenprofil, und die Zugkraft der Lokomotive als Funktion der Geschwindigkeit. Zur Addition der Fahrstift-Auslenkungen dient ein Stahldraht-Seilzug, der auf den Eingang des ersten Steigungsdreiecks einwirkt.

In der Beschreibung bei *Meyer zur Capellen* (1949, S. 245) ist vermerkt, dass je zwei Rollen auf Ober- und Unterseite der Walzen liefen. Das wäre getriebetechnisch vernünftig, ist aber weder in den vorliegenden Fotos noch in dem Exemplar, das im Deutschen Museum München vorhanden war, so aufwendig gebaut; die Angabe ‚Paar‘ wurde wohl missverstanden. In einer Skizze waren zwei parallele Rändelrollen auf einem Schwenkhebel zu sehen.

Der Gesamtumfang des Fahrdiagraphen betrug etwa 1 m auf 1 m; die beiden Personen zum Nachführen der Kurven standen bedienungsfreundlich auf verschiedenen Seiten. Der Antrieb war erst mittels Handkurbel, bald aber durch einen regelbaren Motor.

Zu lösen waren mit diesem ersten Analogrechner außer den bahnbetrieblichen Fahrplanrechnungen [7] auch Probleme der Motorerhitzung bei diskontinuierlichem Fahrbetrieb, ferner natürlich alle Schwingungsprobleme und dergleichen.

Weitere Anlagen zur Fahrzeitbestimmung [7] durch zweifache Integration wurden später noch gebaut von *Bohl* in Frankreich [8]. *Suprunenko* in der Ukraine [9] baute 2 Maschinen, und die Fa. AMSLER / Schaffhausen mit Kugelintegratoren [10]).

Die Reichsbahn-Sicherungswerkstatt in Weiden / Oberpfalz hat 1955 ein Gerät nach *Prof. Stauffer* in Betrieb genommen.

Fa. A. OTT / Kempten baute den Fahrzeitrechner ‚*Conzen-Ott*‘ für die Reichsbahn Kassel, von Amtmann *Conzen* ab 1941 geplant, aber erst 1947 zu bauen begonnen. 1949 war ein Prototyp fertig, er wurde 1955 in Betrieb genommen und bis 1978 bei der Bundesbahndirektion München eingesetzt. Zum Integrieren dienten Kugelkalotten-Getriebe; auswechselbare Kurvenscheiben für jede Lokomotiv-Type und verschiedene Zuggewichte ersparten manuelles Nachfahren. Beachtenswert war der kompakte Aufbau: nur 67 x 59 x 24 cm.

Die Fahrzeitgenauigkeit lag bei 0,1 min, die Dauer einer Streckenaufzeichnung war 18 min. statt manuell 8 Stunden. 4 Geräte wurden gebaut, eines ist in Besitz des Deutschen Museums /München, ein zweites in der Informatik-Sammlung der Uni Erlangen.

Über weitere Anlagen zur Fahrzeitermittlung berichten [11, 12, 13].

A.6.5. Zweifach-Integraph IPM

Das Institut für Praktische Mathematik IPM der Technischen Hochschule Darmstadt, *Prof. Walther*, hatte den dringenden Wunsch, für Lehre und Forschung Schwingungsdifferentialgleichungen mit instrumentellen Mitteln bearbeiten zu können. Nach der Vorführung des Fahrdiagraphen Knorr (1938), der nicht mehr gebaut werden konnte, kam der Gedanke, durch Verkopplung zweier handelsüblicher Integraphen Adler-Ott in der eigenen Institutswerkstatt wenigstens einen ‚Zweifach-Integraphen‘ zusammenzustellen. Das von *W. de Beauclair* vertretene Bauprinzip sah vor, die beiden Geräte auf einer langen Nutschiene nebeneinander in Abszissenrichtung spiegelbildlich verbunden laufen zu lassen

(Abb. 63). Die vier Funktions- bzw. Ergebniswagen sollten auf zwei Nutschienen in Ordinatendrichtung rollen; die Ordinaten-Auslenkungen der manuell abzutastenden Kurven waren durch einen summierenden Stahldraht-Zug auf den Eingang zurück zu übertragen. Um die integrierende Schneidrolle der ersten Integrationsstufe von jeder Belastung frei zu halten, wurde die Verschiebung ihres Unterwagens über eine elektrische Nachführung auf die zweite Stufe übertragen. Im Jahre 1939 erschien dem IPM eine rein elektronische Nachführung mit Röhren zu aufwendig; daher wurde eine primitiv erscheinende aber durchaus wirksame ‚Schwingzungen-Nachführung‘ (Abb. 64) vorgesehen. Eine Kontaktfeder wurde elektromagnetisch mit Netzfrequenz 50 Hz zum Schwingen angeregt. Ihre Kontakte legten sich je nach der gegenseitigen Lage mehr oder weniger lang an die beiden Gegenkontakte an und impulsierten so Stromimpulse auf den mit zwei Wicklungen ausgebauten Antriebsmotor. Dieser drehte somit die Antriebsspindel für die zweite Stufe im resultierenden Maß.

Der Zweifach-Integrator wurde von *W. de Beauclair* am 7.2.1939 im Zuge seiner Diplomarbeit zu bauen begonnen und war am 28.1.1941 endgültig fertiggestellt. Er war in Betrieb bis zur Zerstörung Darmstadts durch die Bombardierung am 11.9.1944. Dieses als Provisorium gedachte Gerät war aufgebaut auf einer Aluminiumplatte von 1,5 x 2,0 m. Es wurde benutzt vor allem für Lehrzwecke, aber auch für Untersuchungen und Lösung von z. B. der Cranz-Rothschen Differentialgleichung der Ballistik. Wegen der kraftfrei-unbelasteten Schneidrolle der ersten Integrationsstufe war die Integration insgesamt ebenso genau wie bei einem Normal-Integrator. Das manuelle Nachführen der gezeichneten Funktionskurven erforderte allerdings Sorgfalt und langsamen Vorschub der beiden Integratoren in Abszissen-Richtung.

Die guten Erfahrungen mit diesem Zweifach-Integrator förderten die Planung für eine leistungsfähige Anlage zum Bearbeiten von Differentialgleichungen höherer Ordnung. Selbstredend konnten nicht mehrere der Integratoren Adler-Ott in einer langen Reihe nebeneinander aufgebaut werden; doch erwies sich das Prinzip der scharfen Rolle als zweckmäßiger als das des *Gonella*-Reibrades, auch wenn es erforderlich blieb, eine Drehmomentverstärkung einzusetzen. Zum Zweiten zeigte sich notwendig, eine automatische Eingabe der Funktionswerte zu entwickeln; manuelles Nachfahren der Kurvenlinien war nicht machbar. Es folgte daher eine Periode des Studiums und der Versuche, praktikable Lösungen für diese beiden Hauptprobleme zu erarbeiten.

A.6.6. ‚Differential Analyser‘ von *Vannevar Bush*

Vannevar Bush, seit 1925 am Massachusetts Institute of Technology MIT, hatte ab 1920 an einen mechanischen ‚Differential Analyser‘ gedacht und 1931 (zehn Jahre *nach Udo Knorr*) einen ersten erbaut. Er integrierte mit Reibrad-Getrieben nach *Gonella* mit einer umlaufenden Glasplatte (gab dx ein), die um y radial verschieblich war, und einem Metall-Reibrad, welches das Integral ydx lieferte. Dessen geringes Drehmoment erforderte einen angeschlossenen Reibband-Drehmomentverstärker. Dieser arbeitete nach dem Prinzip eines Gangspills und hatte eine hohe Verstärkerleistung; er wurde von *C. W. Niemann* / BETHLEHEM STEEL CO. (1886-1963) entworfen und für *Bushs* Anlage adaptiert [14]. Um die angeschlossenen Wellen, Triebe und Schreiber antreiben zu können, waren sogar zwei solcher diffizilen Drehmomentverstärker an jeden Integrator angebaut (Abb. 65), je für beide Drehrichtungen.

Zum Ausgleich seines unvermeidbaren Spiels dienten mechanische justierbare Vorrichtungen, die bei Drehrichtungs-Umkehr eine geringe Winkelvoreilung bewirkten [15]. Die Genauigkeit dieser Reibrad-Integratoren war recht hoch; insgesamt arbeitete die Anlage besser als 2 % genau; sie kostete um 25 000 \$.

Die mechanischen Teilgeräte waren zu beiden Seiten eines Traktes von mehr als 10 parallelen Wellen aufgebaut; 4 Kurventische für manuelle Funktionseingabe waren auf der einen, 6 Integratoren auf der anderen Seite. Sie waren je nach der Aufgabenstellung über Kegelrad-Kupplungen, wechselbaren Übersetzungen und Addiergetrieben mittels jeweiliger quer darüber angebrachten Wellen an eine der Koppelwellen anzuschließen. Das Einrichten der Anlage auf neue Aufgaben war daher sehr zeitraubend und aufwendig; sie war jedoch im Wesentlichen für häufiges Durchrechnen einer bestimmten Aufgabe nur mit wechselnden Parametern, Anfangsbedingungen, Faktoren und Eingabekurven bestimmt [16]. Die nachfolgend gebauten Maschinen erhielten bis zu 14 Integratoren.

1942 wurden elektrische Verbindungen aus Winkelgebern (mit umlaufenden gegeneinanderstehenden Flügeln eines Drehkondensators bzw. von Polarisationsfiltern) und Servomotoren zwischen den Geräten statt der Wellen eingebaut; sie waren auf einem zentralen Koppelfeld mit Relaischaltern über einen Programm-Lochstreifen beliebig zu verschalten. Ebenso waren später die Maßstabsfaktoren mittels Lochstreifen einzustellen. Damit war das Einrichten von einigen Tagen auf wenige Stunden verkürzt (VICKERS / GB und SPERRY GYROSCOPE CO.)

Diese Differentialgleichungsmaschine (DGM) erfüllte einen großen Bedarf bei wissenschaftlichen Instituten; sie wurde daher auch mehrmals, meistens mit verbessernden Änderungen nachgebaut, unter anderem:

- 1934 von der Moore School of Electrical Engineering / University of Pennsylvania für das BALLISTIC COMPUTATION LABORATORY, US Army Aberdeen Proving Ground / Maryland, das Schusstafeln berechnete und dringend bessere Mittel als die Heerschar von Rechnerinnen suchte, und deshalb auch bester Kunde für digitale Relais- und Elektronenrechner war;
- an der Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, für sich selbst;
- beim Forschungslabor der GENERAL ELECTRIC CO. von *H. P. Kuchini und H.A. Peterson*, von der University of California in Los Angeles UCLA 4 Anlagen;
- In England wurde zuerst 1935 ein kleines Modell von *Hartree und Porter* / Universität Manchester aus Teilen eines Mecano-Spielbaukastens gebaut, das aber dennoch recht befriedigend genau war [17]), es kostete rd. 20 £; danach 1939 eine große Anlage [18];
- In Dublin von MASSEY, WYLIE, BUCKINGHAM UND SULLIVAN eine kleine Anlage mit 4 Integratorstufen [19];
- von *Prof. Svein Rosseland* / Universität Oslo, Institut für Physik, eine weitgehend verbesserte mit 12 Integratoren, rd. 0,03 % Genauigkeit und einem Platzbedarf von rd. 17 m² (Abb. 66a);
- in Leningrad entstand ein genauer Nachbau der Maschine in Cambridge, nachdem schon 1904 *A. Krylov* ein Versuchsgerät mit 4 Integratoren nach *W. Thomson* entwickelt hatte;
- und schließlich eine Anlage an der Ingenieurschule Ilmenau / DDR, (Abb. 66b).

Bemerkenswerte Besonderheiten der nachgebauten Integrieranlagen waren z. B.:

- Abtastung der Drehung der Integrierrolle mittels zweier Strahlen polarisierten Lichts,
- Vergleich der Phasenlagen und Steuerung zur Drehmomentverstärkung dienenden Brückenschaltung (so bei UCLA / GE) und
- lichtelektrisches Nachführen des Funktionkurven-Abtasters durch zwei Lichtpunkte, welche die schwarz gezeichnete Kurve zwischen sich halten sollen.

Die Arbeitsgenauigkeit der Integration insgesamt ist beispielsweise beim GE-UCLA-Analyzer 0,1 %, wobei die der Einzelgeräte bei 0,01 % liegt [Fifer S. 688].

Ab 1935 bis 1942 entwickelte *Bush* noch eine rein elektromechanische Version einer analogen Integrieranlage (s. B.6.3), als schon digitale Rechen-Schaltungen entworfen waren, z. B. der Electronic Numerical Integrator and Calculator ENIAC. *Bush* war durch die Erfolge seiner Entwicklungsarbeiten so sehr dieser Gedankenrichtung verhaftet, dass er den neuen digitalen Lösungswegen und insbesondere der Schaltöhre in Rechnern auch als maßgebender Gutachter keinen Erfolg beimaß.

A.6.7. Integrieranlage DGM IPM-OTT

A.6.7.1. Entwicklung

Nach der Besichtigung der schönen Anlage von *Rosseland* / Oslo im Herbst 1940 waren *Prof. A. Walther* und seine Mitarbeiter *Theodor Zech*, *W. de Beauclair* und *H.-J. Dreyer* vom Institut für Praktische Mathematik IPM der TH Darmstadt einhellig der Meinung, dass sie durchaus brauchbar, aber nicht mehr zeitgemäß gebaut sei.

Drei strenge Forderungen wären an eine modernere Integrieranlage zu stellen: sie müsste aus Einzelgeräten bestehen und elektrisch mit einer Koppeltafel leicht zusammenschaltbar sein, und statt der Reibrollen sollte das beim Integraphen Adler-Ott bewährte Schneidrollen-Prinzip benutzt werden. Der damals nicht auszusprechen erlaubte Hintergedanke war bei *A. Walther*, dass die Anlage bei einer besseren Bewertung von einer der NS-Forschungsstellen bzw. vom Militär für dessen Rechenprobleme requiriert und ins Deutsche Reich abtransportiert würde, was er unbedingt vermeiden wollte.

Walthers IPM hatte 1939 einen Auftrag über Berechnungen von der Heeresversuchsanstalt Peenemünde erhalten. Darin war eine „Lösung möglichst auf instrumentellem Wege“ gefordert. Daraufhin drängte er immer wieder auf Mittel zum Bau einer ‚Differentialgleichungsmaschine‘, da eine solch teure für die Wissenschaft notwendige Anschaffung nicht vom schmalen Etat seines Institutes, sondern wie in den USA, nur aus staatlichen Mitteln zu bezahlen war.

Die Entwicklung begann nach Auftragserteilung und Mittelzuweisung (12.2.1941) am 18.7.1941 unter wissenschaftlicher Leitung des IPM. *Hans - J. Dreyer* übernahm den elektrischen Teil; die Verstärker usw. wurden vom IPM gebaut. Von *W. de Beauclair* wurde die Konstruktion betreut, u. a. die des auch hier erforderlichen Drehmomentverstärkers. Dieser wurde in der Werkstatt des IPM gefertigt, wie auch sonstige Prototypen hier entworfen, geprüft und bereitgestellt wurden. Gebaut wurde die Gesamtanlage von der Firma A. OTT / Kempten unter Leitung von *Dr.-Ing. Ludwig A. Ott*; *Ing. Riedle* war der sehr geschickte Konstrukteur.

Diese DGM IPM-OTT wurde um den 27.6.1944 fast fertig erstmals vorgeführt; sie überstand das Kriegsende in einer Kegelbahn im Keller einer dem Werk nahe gelegenen Gaststätte (Abb. 67a). Zur Ingenieurtagung in Darmstadt 1947 wurde ein Teil davon beim IPM installiert; voll arbeitsbereit war sie 1948 (Abb. 67b).

Diese Anlage war bis 1956 in Betrieb, und zwar zum Bearbeiten von nichtlinearen Differentialgleichungen, Flammengeschwindigkeits-Berechnungen, Bahnen elektrischer Teilchen, hyperbolisch gekrümmte Dachschaalen, An- und Auslauf von Turbinen, Regelgüte und Stabilität nichtlinearer Folgereger, Besselfunktionen und vieles mehr.

	Die Gesamtanlage sollte nach ursprünglichem Plan bestehen aus:	Aufgestellt waren 1947:
Funktionsabtaast-und Ergebnistisch	14	6
Integratoren	15	4
Multiplikatoren	10	2
Addiergetriebe	20	8
Schaltstecktafeln	3	1
einschließlich Zubehör: <ul style="list-style-type: none"> • Frequenzumformer auf 500 Hz für die Fernübertragungssysteme, • Festwertgeber für die Anfangswerte mit stufenlosem Kugelkalotten-Reibgetriebe, auswechselbare Zahnradübersetzungen in allen Geräten. Später wurde von <i>Ludwig A. Ott</i> noch eine zweidimensionale Kurvenkörper-Abtastung vorgesehen.		

Die Anlage arbeitete mit weniger als 1 % Fehler insgesamt recht genau, war jedoch wartungsempfindlich, besonders die sehr sensiblen mechanischen Drehmomentverstärker. Sie wurden deshalb später durch eine trägere elektrische Motornachsteuerung ersetzt.

Eine Ergebniskurve von 60 cm Länge wurde in 10 bis 20 min aufgezeichnet. Das war beträchtlich schneller als eine manuelle Iterationsrechnung mit den damals verfügbaren Rechenmaschinen. Bei diesen war mit etwa 3 Stunden Arbeitszeit je Iterationsschritt zu rechnen und also mit annähernd 150 Stunden Gesamtarbeitszeit einschließlich Kurvenzeichnen für eine Kurve aus 50 Stütz-Ordinaten. Allerdings waren für jede neue Aufgabenstellung mancherlei Vorüberlegungen über Maßstabs-Faktoren usw., sowie Einstell- und andere Vorbereitungsarbeiten erforderlich. Die bereits entstehenden elektromechanischen Analogrechner (s. B 6) waren natürlich um ein Vielfaches schneller in der Arbeit, die auch hier notwendigen Einstellungen aber ebenfalls zeitraubend.

Von dieser DGM IPM-OTT sind nach dem Tod von *Prof. Alwin Walther* (1967) und der Auflösung des IPM der THD nur einige Teilgeräte bewahrt und im Deutschen Museum aufgestellt worden, darunter Integratoren und ein Drehmomentverstärker (vom Autor gestellt).

A.6.7.2. Bauprinzipien der Einzelgeräte der DGM IPM-OTT

Zum Integrieren dient eine scharfe Rolle, die in Tangenten-Richtung verschwenkt wird (Abb. 69). Sie läuft, federnd gelagert mit einstellbarem Druck, auf einer Neusilberplatte; es bleiben keine Spuren in der Unterlage. Dieses Schneidenrad braucht diese nicht zu verschieben, es kippt bei Vorschub in x-Richtung leicht in seiner Halterung. Dadurch wird ein kleiner Spiegel im Lichtstrahl einer lichtelektrischen Nachführung verstellt, welche die Unterlage so lange in y-Richtung verschiebt, bis der Spiegel wieder in Mittelstellung steht. Die scharfe Rolle hat also keinerlei Kraft aufzubringen, um weitere angeschlossene Baugruppen anzutreiben.

Die Multiplikation erfolgt nach dem Strahlensatz: ein Lineal wird verschwenkt, ein dessen Kante abtastender Fühler weicht wie das Spiegelhebelchen bei der Integratorrolle etwas aus, und lichtelektrische Nachführung steuert den Vorschubmotor so, dass diese Auslenkung zurückgenommen wird. Beide Geräte sind also weitgehend identisch. Später wurde die Linealkante direkt lichtelektrisch abgetastet wie bei der Kurveneingabe; das war bei größeren Werten der Linealschräglage in den äußeren Bereichen zuverlässiger.

Eine lichtelektrische Kurvenabtastung (Abb. 70) wurde realisierbar, weil die Firma VISOMAT /Leipzig gerade neuartige Fotozellen entwickelt hatte, die, wie ein Besuch am 5.4.1941 ergeben hatte, klein genug und brauchbar waren.

Die Kurvenabtastung beim Funktions-Eingabetisch (Abb. 71) und der Zeichenstift beim Ergebnistisch liegen an genau gleicher Stelle, so dass Ergebniskurven ohne erneutes Justieren direkt wieder abgetastet werden können. Der Lichtpunkt folgt einer Kante des Kurvenstriches; ein Beobachtungsloch erlaubt die visuelle Kontrolle des Abtastens, d. h. der Lage des Striches auf der weißen Blende mit dem Loch zum Lichtdurchgang zur Fotozelle.

Der äußere Aufbau aller dieser Gerätetypen ist durch Verwendung eines einheitlichen Guss-Grundrahmens nahezu gleichartig (Abb. 72). Eine Holzumkleidung mit Plexiglas-Scheiben schützt alle Einzelbaugruppen bei Nichtgebrauch (Abb. 73).

Die Koppel-Stecktafel (Abb. 67a) musste leider sehr grobschlächtig ausgeführt werden, weil für die Drehwert-Fernübertragung mit 500 Hz FÜ-Systemen (*Selsyn*) mehrpolige Steckverbindungen notwendig sind; die im Flugzeugbau vorhandenen *Tuchel*-Mehrpol-Stecker mit Abschirm-Schraubverbindung waren jedoch allein für das Militär reserviert. Es blieb nur übrig, normale Drehstromstecker und -dosen zu verwenden.

Der Drehmomentverstärker (Abb. 74) ist jeweils nötig, weil die durch die Röhren-Verstärkung zu gewinnende elektrische Leistung immer noch zu gering ist, um alle Spindeln im Gerät selbst und in angeschlossenen Geräten zu treiben. Es wird ein masseärmster Ferraris-Motor erregt, der den Eingang der Reibbändchen verschwenkt (Abb. 74); ausgangsseitig folgt ein Abtriebskettenrad dieser Verschwenkung mit rd. 80-fach stärkerem Drehmoment. Die Reibbändchen sind aus Stahlband mit textilem Überzug, der mit Korkmehl, Graphitpulver und Kleister imprägniert ist. Dieses Bauelement reagierte sehr präzise, war aber verständlicherweise wartungsbedürftig; es wurde später durch rein elektrische Verstärkung mit starkem Motor ersetzt. Diese reagierte aber weit weniger spontan.

Die Firma A. OTT / Kempten versuchte natürlich, diese Anlage auch weiteren Interessenten anzubieten; es gab eine Version für KRUPP / Essen und eine für die DEUTSCHE VERSUCHSANSTALT FÜR LUFTFAHRT DVL. Auch *Walther* wollte neben dieser ersten Anlage, die ja nur für unmittelbare Wehrmachtzwecke zu benutzen war, für sein Institut eine frei verfügbare zweite Anlage erhalten. 150 000 RM waren schon bewilligt dafür, aber es durfte doch nur die eine Anlage gebaut werden.

Die Firma A. OTT hatte neben diesem Großauftrag DGM und dem für die Brennschlussgeräte (s. A.5.6.3) selbstverständlich noch weitere kriegswichtige Arbeiten aufgebürdet bekommen, die in keiner Weise in ihr angestammtes Betriebskonzept passten und mit Umorganisation bezahlt werden mussten. Wie bei allen feinmechanischen Firmen im Allgäu (HAFF, MAHO, RIEFLER, WETZER u. a.) waren ursprünglich die Facharbeiter noch Nebenerwerbs-Landwirte; sie blieben zur Zeit des Heuens und des Holzschlags der Arbeit fern. Jeder der Feinmechaniker hatte sein Spezialgebiet, er baute ‚sein‘ Planimeter in bester Qualität und fühlte sich dafür verantwortlich. Aber an Termintreue war nicht zu denken, und nicht an rationelle Betriebsführung. Als mit den der Kemptener Firma auferlegten Kriegsaufträgen auch Fremdarbeiter verpflichtet worden waren, wurden die alten Fachkräfte Vorarbeiter und Meister. Die offizielle Qualitätsabnahme durch Wehrmachts-Personal sicherte das Einhalten aller Vorschriften, aber auch diesem ein ruhiges Leben an der Heimatfront; zum Nachweis der Notwendigkeit der Prüfstellen wurden Brennschlussgeräte bester Funktion nicht abgenommen, weil die Farbe des Gehäuses nicht voll dem Standardton entsprach.

Nach Kriegsende gingen die Dienstverpflichteten und mit ihnen alle tragbaren Werkzeuge und Materialien; die zu Meistern gewordenen Stammkräfte waren zur alten Arbeit unlustig. Es wurden zwar noch die bewährten Wasser-Strömungsmessflügel sowie der neue Fahrzeitrechner *Conzen*-OTT (s. A.6.4) hergestellt, sonstige mathematische Geräte

waren aber kaum mehr gefragt. Der weltweite Ruf und Rang im Export von mathematischen Instrumenten höchster Präzision geriet in den folgenden Jahrzehnten auch in der Firma weitgehend in Vergessenheit.

Die Firma A. OTT hatte ihren Instrumenten keinen Patentschutz gegeben; von Wettbewerbern könne allenfalls zwar die Form nachgeahmt, aber nicht die Qualität erreicht werden, welcher OTT seinen Ruf verdanke. Zusätzlich, sagte *Dr. L. Ott* nicht nur scherzhaft, bewiesen sein Instrumente bei weltweiten Einsatz ihre Brauchbarkeit dadurch, dass sie in stabilen Holzetuis mit Polsterung und wasserfester Verpackung auch Kameltransporte in der Wüste und Floßfahrten im Inneren Asiens unbeschadet überstanden.

A.6.8. Weitere Integrieranlagen

A.6.8.1. Integrieranlage der Firma ASKANIA

Parallel zur Differentialgleichungsmaschine (DGM) des IPM Darmstadt entstand ab Mai 1940 im Auftrag des Heereswaffenamtes (*Prof. Schweikert*) unter wissenschaftlicher Leitung von *Prof. R. Sauer* und *H. Pösch* am Institut für angewandte Mathematik der TH Aachen bei der Firma ASKANIA / Berlin mit *Dr. Bückner* und *Ing. Schomann* eine Integrieranlage [21].

Ihr Bauprinzip war gekennzeichnet durch Verwendung von Integratoren nach Rolle-Scheibe- (*Gonella*-) Prinzip mit elektrischer Verstärkung des Drehmomentes und Verkopplung mittels Drehfeld-, *Selsyn*-Fernübertragungs-Systemen. Trotz strenger gegenseitiger Abgrenzung der Auftraggeber und der kriegsüblichen Geheimhaltung verständigten sich *R. Sauer* und *A. Walther* darüber, dass diese Verkopplung ein Zusammenbau mit den Einzelgeräten der DGM IPM-OTT gewährleisten sollte. Auf den Multiplikator wurde verzichtet, er wurde durch doppelte Integration ersetzt. Manuelle Funktionseingabe und Ergebnis-Aufzeichnung auf Trommelplothern war vorgesehen. Daher gab es weniger Begrenzungen bei den Zeichenflächen zu beachten, und die Geräte waren kleiner (Abb. 76). Die elektrische Verkopplung mit FÜ-Systemen wurde von *Prof. Peters* (Luftfahrtforschungsanstalt Ottobrunn / München) entwickelt.

Als Hauptanwendungsgebiete waren geplant:

- Tafelwerke für technisch wichtige Funktionen,
- Integrationen zur Festigkeitslehre und Flugmechanik,
- Schwingungs- und Stabilitätsprobleme,
- Herstellung von Nomogrammen für Fertigung und Betrieb,
- Differentiationsaufgaben bei Steuerungs- und Ortungsproblemen.

Ein Prototyp mit 2 Integratoren (Abb. 76), 2 Funktionseingaben, 1 Summentrieb, Schaltschrank und Zubehör war bereits 1942 in Erprobung und erwies sich mit 0,01 % als sehr genau [21]. Er wurde Ende 1943 bei einem Luftangriff zerstört. *Dr. Bückner*, Mathematiker bei ASKANIA, entwickelte eine spezielle Schaltung zur angenäherten Differentiation, die bei der Erprobung „unerwartet günstig“ arbeitete. Er entwarf nach Kriegsende die Integrieranlage MINDEN (s. A.6.8.3).

A.6.8.2. Integrieranlage von *Rolf Engel* / Danzig

Eine dritte universell einsetzbare Integrieranlage wurde unabhängig von den vorerwähnten ab 1937 von dem hauptsächlich und von den ersten Anfängen an für die Entwicklung von Feststoff-Raketen arbeitenden *Rolf Engel*, dem Gegenspieler von *Wernher von Braun* / Peenemünde, bei der Raketenforschungsstelle des SS-Waffenamtes, der Versuchsanstalt Großendorf bei Danzig, entwickelt und bei der Firma GERÄTEENTWICKLUNG DANZIG GMBH in Langfuhr mit *H. Laskowski* gebaut [22a]. Er hatte bereits seit 1935 am Problem des instrumentellen Integrierens gearbeitet und sich entschieden, einen Reibradtrieb mit

genügendem Drehmoment zu benutzen. Er kam nach vielen Versuchen zum Hartgummirad auf Metallscheibe. Problematisch war dabei die bohrende Wirkung mit Abnutzung der Rolle im Scheibenmittelpunkt.

Er kam auf den Ausweg, zwei Reibräder (Abb. 33) mit zwischengeschaltetem Differential auf beiden Seiten der Scheibe laufen zu lassen; die Summe beider Drehungen wurde abgegriffen (Abb. 77). Der Drehpunkt der Scheibe wurde somit überbrückt, Schlupf und Abnutzung vermieden.

Beliebig freie Verkopplung der Geräte war vorgesehen. Er entwarf zur Darstellung der Koppelpläne ein eigenes Symbol: ein ‚Dreibein‘ mit zwei Eingangs- und einem Ausgangspfeil (Abb. 61b). Dies war klarer als die von V. Bush eingeführte, an dessen Wellentrakt angelehnte Symbolik.

Die Reibräder konnten auch rückwärts zum Antrieb der Scheibe dienen; die Anlage konnte somit auch für sonst nicht bearbeitbare Probleme geschaltet werden.

Rolf Engel reichte bei Prof. Pohlhausen / TH Danzig eine Dissertation ein über ein ‚natürliches System‘ von Differentialgleichungen, die mit seiner Integrieranlage bearbeitet werden könnten [22b].

Eine Anlage wurde 1940 in Betrieb genommen. Sie erreichte ohne Drehmomentverstärkung eine Genauigkeit von rd. 1%. Sie hat das Kriegsende nicht überstanden. Rolf Engel ging als Raketenspezialist nach Frankreich und Ägypten und war zuletzt bei MESSERSCHMITT-BÖLKOW-BLOHM / München.

A.6.8.3. Integrieranlage MINDEN

Basierend auf der Integrieranlage von ASKANIA entwarf H. F. Bückner eine große mechanische Integrieranlage [23]. Er hatte 1947 mit Ing. Schomann und anderen Mitarbeitern die Firma RECHENAUTOMATEN GMBH / Göttingen gegründet und erhielt von der britischen Besatzungsbehörde den Auftrag, die Anlage bei der ebenfalls neu gegründeten Firma SCHOPPE & FAESER / Minden bauen zu lassen.

Die britischen Professoren Porter und Womersley, Mitarbeiter des Computerpioniers D.R. Hartree, hatten (wie Bush / USA) von einer elektronischer Bauweise mit Röhren abgeraten.

Die erste Integrieranlage MINDEN wurde 1951-1952 an das National Physical Laboratory NPL in Teddington / GB geliefert [24], (Abb. 78-82) Eine zweite Anlage erhielt die Universität Bonn 1954 [25], die letzte ging 1955 zur Firma SIEMENS-SCHUCKERT nach Erlangen [26], (Abb. 83-86).

Kennzeichnend war neben dem Reibrad-Prinzip die Drehfeld-Übertragung mit 1 000 Hz und eine sehr hochgezüchtete Fertigung, welche eine Genauigkeit von 0,02 % im dynamischen Betrieb gewährleistete.

Auch hier wurden, wie beim Prototyp ASKANIA, keine Multipliziergeräte vorgesehen. In Bonn schien es dagegen wichtig, die Integratoren auch rückwärts vom Reibrad her anzutreiben, wie es Engels Maschine (s. A.6.8.2) konnte; nach längeren Versuchen gelang es nur mit zusätzlichen Nachführ-Verstärkern.

Umfang der Anlagen:

	NPL Teddington	Uni Bonn	SSW Erlangen
Integratoren	20	8	12
Summentriebe	50	12	20
Funktionseingaben	8	8	4
Ergebnisaufzeichng	4	2	2

Siemens / Erlangen (*Obering. Hoffmann*) hatte 1950 festgestellt, dass die damaligen selbst zu bauenden Röhren-Computer nicht betriebssicher genug seien (erst 1955/56 kamen Computer der Firmen IBM bzw. UNIVAC aus Serienfertigung auf den Markt). Erprobte mechanische Integrieranlagen seien dagegen für alle vorliegenden mathematischen Aufgaben besser geeignet, auch weil sie der Denkweise der Ingenieure entgegenkämen. Die Anlage war dort bis 1971, d. h. 16 Jahre lang mit rd. 6 Stunden täglich in Betrieb.

Die von *Vannevar Bush* so weitreichend eingeleitete Technik der mechanischen Differentialgleichungsmaschinen hatte durch die vornehmlich in Deutschland verfolgte Aufgliederung in leicht verkoppelbare Einzelelemente, wobei die Integratoren leistungsfrei und also sehr präzise liefen, mit den jetzt gebauten Anlagen einen Höchststand erreicht [27].

A.6.8.4. Sonstige Entwicklungen – kurze Hinweise

Entwicklungen für ballistische Integratoren liefen ab 1937 seitens *P. Füsgen* (RHEIN-METALL-BORSIG / Düsseldorf) an der TH Aachen; er promovierte über ein ‚Flugbahnrechnergerät‘ mit *Prof. Sauer* als Korreferent (1937).

Auch *Christel Hamann*, erfolgreicher Chefkonstrukteur der DETEWE-RECHENMASCHINENFABRIK / Berlin, hatte um 1942 solche Entwicklungen betrieben.

Noch 1949/50 versuchte der Physiker *Prof. Bopp* der TH München mit *F. L. Bauer* eine eigene Integrieranlage zu bauen; zwei Integratoren mit Drehmomentverstärkern nach Bush wurden in der Institutswerkstatt aufgebaut, doch kein brauchbares Gerät gewonnen. *Prof. Bauer*, der eine elektronische Lösung bevorzugt hätte, wurde später der führende Mathematiker bei der Entwicklung des Computers PERM in München und seiner Software.

Die Eidgenössische Technische Hochschule ETH / Zürich, Institut für angewandte Mathematik, *Prof. Stiefel* und *Dr. Speiser*, hatte einen Vierfach-Integrator mit scharfen Rollen auf Zylindern (Vorbild *Knorr*), die durch ein Parallelogrammgestänge geführt wurde; er war auf einer großen Platte aufgebaut.

CONTRAVES AG / Zürich baute eine elektro-mechanische Integrieranlage IA 55 (s. B.6.1) mit mechanischen Integratoren, die elektrisch durch Rechenkondensatoren verkoppelt waren; wahlfreie Zusammenschaltung erlaubte ein Kreuzschienen-Steckbrett.

AMSLER / Schaffhausen baute einen Vierfach-Integrator aus Amslerschen Standard-Kugelintegratoren usw. mit elektrischer Verkopplung nach System *Amsler* mittels 7 Leitungen und Kollektor. Eine Funktionseingabe mit lichtelektrischer Abtastung und zwei Zeichentrommeln waren kombiniert mit der Ergebnisaufzeichnung. Die Integratoren waren gleichzeitig Addiergetriebe. Das Drehmoment der Kugelintegratoren war ausreichend, um ohne Verstärkung die angeschlossenen Bauelemente anzutreiben. Die Nulllage war beliebig einzustellen, um stets im genauesten Bereich arbeiten zu können.

In der UdSSR wurde von der Akademie der Wissenschaften im Institut für Instrumente und Automations-Methoden der Anfang (*Krylov*, 1911) fortgeführt (s. B.9.6) [*Eterman* S. 39 ff]. 1938 wurde eine mechanische Integrieranlage mit 6 Integratoren gebaut, Ende 1954 wurde ‚Integral I‘ gebaut mit 24 Integratoren, 24 Addiergetrieben, 4 Multiplizierern und 16 Funktions-Eingabe-Tischen. Die Maschine wog 25 Tonnen und bedeckte 250 m². Bis zu 10 Funktionen konnten gleichzeitig aufgezeichnet oder mit 6 Ziffernstellen aufgelistet werden.

A.6.8.5. Bedeutung der Analogrechner – gestern und heute

Diese Auflistung und Beschreibung von einigen der mechanischen Analogrechner soll nachweisen, wie groß der Wunsch der Wissenschaft war, für die Bearbeitung von technischen Aufgaben leistungsfähige Apparate zu erhalten. Diese Integrieranlagen bedeuteten sicherlich einen Höhepunkt in der Entwicklung mathematischer Rechnergeräte. Wie leider fast überall und immer in Kriegszeiten war auch hier das Militär im Wesentlichen

der Geldgeber. Der rührige Wissenschaftler, der sein Fachgebiet fördern und zur Lehre ein zeitgemäßes Instrumentarium besitzen wollte, sah sich angesichts der geringen ‚sauberen‘ Forschungsmittel gezwungen, diese auch ihm dubiose Quelle dafür zu erschließen, auch wenn er sie verabscheute. Dass er sich damit in einen Gewissenszwiespalt begab ist in ruhiger Zeit von der nächsten Generation kaum nachzuvollziehen. Grundgedanke dabei war ihm, dass die Ausbildung des mathematischen Nachwuchses und die Wissenschaft auch über die gewiss vorübergehenden politischen Katastrophen hinaus ernsthaft weitergetragen werden müssten.

Beim Betrachten der weiträumigen und schwerfälligen mechanischen Integrieranlagen der Zeit um 1950 im Vergleich zu den nach nur 40 Jahren weitverbreiteten kleinen Personal-Computern, die mit ihrer universellen Programmierbarkeit alle Möglichkeiten der iterativen Näherungsberechnung von Differentialgleichungen bieten, darf jetzt aber keine Missachtung der damaligen Leistung aufkommen.

Die Wissenschaftler und Konstrukteure – Maschinenbau-Ingenieure, bestenfalls Feinmechaniker – mussten sich an die technischen Gegebenheiten ihrer Zeit halten; auch penibel gewünschte Ausgestaltung der Bauelemente war mittels der damals vorhandenen Werkzeugmaschinen nur in heute grobschlächtig anmutenden Dimensionen möglich. Nur der Uhrmacher war in der Lage und gewohnt, mit der Lupe am Auge feinste Drehteile herzustellen; selbst der Drehmomentverstärker der DGM IPM-OTT (Abb. 78) erhielt von *Dr. L. Ott* ein Lob wegen ‚subtiler Konstruktion‘.

Heute wird unter dem Mikroskop, mit Laserstrahl und numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen gearbeitet; filigrane Bauteile sind herstellbar. Doch auch die ersten Digitalcomputer (ENIAC) mit Elektronenröhren waren in diesen Pionierzeiten raumfüllende Anlagen, samt Kühlanlage größer und stromfressender als etwa die Integrieranlage MINDEN.

Man könnte sich durchaus vorstellen, dass jetzt ein *Gonella*-Trieb mit rotierender Platte und Messröllchen so ähnlich wie die heute üblichen Diskettenspeicher mit minimalem Durchmesser von rd. 5 cm herzustellen sei, mit einem Integrierröllchen am Ende des Schwenkhebels, Übergang zu Analogrechnern mit Miniatur-FÜ-Übertragung zu einem elektronischen *Crossbar*-Schalter mit variabler Programmierung und mit Eingabe der Anfangswerte und Faktoren über die Tastatur. Dann wäre ein modernster leistungsfähiger Analogrechner mit vielen Integrator-Laufwerken in den Abmessungen eines PC-Towers denkbar, und er fände vermutlich neben oder besser innerhalb eines PC-Netzwerkes seine zweckmäßige Anwendung.

In Abschnitt A.6 war bereits erwähnt worden, dass die seinerzeitigen ‚Differential Analyzer‘ eigentlich schon Analogrechner waren, weil sie der numerischen Rechnung unzugängliche technisch-physikalische Probleme dadurch einer Lösung zuführen, dass im Zusammenwirken von vielen Rechenelementen ein genau gleiches mathematisches Gesetz befolgt wird. Es liegt eine Analogie zwischen zwei durchaus verschiedenen physikalischen Systemen zu Grunde. Ein Analogrechner wird prinzipiell gewonnen, wenn zur Lösung eines mathematischen Problems (das im Allgemeinen einen vorliegenden physikalischen Vorgang beschreibt) ein anderes physikalisches System aufgebaut wird, das den Zustand und den Ablauf des in Frage stehenden Problems zu messen oder zu verfolgen erlaubt.

Analoge Systeme können unter Umständen sogar das zu untersuchende System ersetzen, falls dieses nur durch Zerstörung oder mit zu großem Aufwand selbst untersucht werden könnte; so wird aus einem Analogsystem eine Simulation, eine Nachbildung.

Über Analogrechner im heutigen engeren Sinn wird unter C.3 berichtet.

A.7. Schwingungsüberlagerer

Die Fourierreihe stellt die Nachbildung von periodisch ablaufenden Vorgängen durch eine Überlagerung von Sinus-Schwingungen dar. Die Reihenglieder sind durch die Grundwelle und Oberschwingungen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz bestimmt; die Amplituden und Phasen der Teilwellen bzw. Amplituden der Sinus- und Cosinus-Komponenten sind für die resultierende Kurvenform der Überlagerung maßgebend (Abb. 49).

Es ist für mancherlei Probleme der technischen Wissenschaft nützlich, diese Fouriersynthese, die Überlagerung bildlich darstellen zu können. Bevor elektronische Oszillographen vorhanden waren, also bis etwa um 1955, konnte es nur mechanische Modelle bis zu hochentwickelten Großinstrumenten geben.

A.7.1. Eindimensionale Fouriersynthese

dient im Wesentlichen zur Überprüfung einer vorherigen harmonischen Analyse, jedoch ist die Gezeitenvorhersage mit Tidentabellen eine überaus wichtige Anwendung der Synthese (Abb. 8).

1. Eine stetige Summenkurve der Teilschwingungen lässt sich bilden durch Summation der Teilschwingungen, welche
 - a) durch je einen Kurbeltrieb angenähert nachgebildet werden können. Radius und Phasenwinkel der Kurbeln sind einstellbar; die Sinuswelle wird umso genauer, je länger die Kurbelschleife ist.
Nach diesem Prinzip wurde u. a. auch am Institut für Praktische Mathematik IPM der TH Darmstadt ein Demonstrationsmodell gebaut [1], das die Überlagerung groß und deutlich auf Papier aufzeichnet (Abb. 87).
 - b) Genaue Sinuswellen liefern Kreuzschleifen-Getriebe. Diese werden daher bei allen messtechnisch nutzbaren Synthesatoren angewendet, namentlich bei den Gezeiten-Rechenmaschinen.
2. Reicht es aus, statt einer stetigen Summenkurve eine mehr oder weniger dichte Punktfolge von ‚Stützstellenwerten‘ zu erhalten, so stehen neben den rechnerischen Methoden mit Zahlentabellen bzw. Schemablättern auch instrumentelle Konstruktionen zur Wahl.

Der Synthesator von *Michelson und Stratton* [2] und andere Vorschläge hatten keine Anwendung gefunden.

Vom Autor wurde vorgeschlagen [3], auf einer schrittweise den Koeffizienten proportional angetriebenen Unterlage (etwa als umlaufende Walze ausgeführt) eine Reihe von so vielen Messrollen anzuordnen, wie Stützstellen gewünscht sind. Diese Messrollen werden jeweils den Winkelwerten der Teilwellen entsprechend verschwenkt (Abb. 88). Eine selbsttätige Steuerung der Walzendrehung mit Einstellzählern und der Schwenkung der Messrollen ist leicht zu realisieren.

Angesichts der stetige Kurven zeichnenden Kurbelschleifen-Überlagerer hat eine solche lineare Anordnung von nur Zahlenwerte liefernden Messrollen aber wenig Sinn. Sehr viel mehr Beachtung fand dieses Prinzip jedoch bei Überlegungen zur zweidimensionalen Fouriersynthese (s. A.7.2 und B.8.2).

A.7.2. Zweidimensionale Fouriersynthese

Sie wurde um 1940 von größtem Interesse in Folge der aktuellen Fortschritte der Röntgenstruktur-Analyse von Kristallgittern. Sie war wichtig, um aus den mittels Röntgenbestrahlung aus dem Laue-Diagramm gewonnenen Messwerten ein zweidimensionales Bild der Kristallstruktur, besser der Elektronendichteverteilung im Kristallgitter darzustellen. Prof. *Walther* / IPM erhielt am 12.3.1942 den dringenden Auftrag, instrumentelle Hilfsmittel zur Erleichterung der sehr aufwendigen und langwierigen rechnerischen Synthese zu erstellen. Der Autor hat daraufhin neben viel schneller zu realisierenden rechnerischen Verfahren mit Schemavordrucken [4] auch zweidimensionale Überlagerer für eine Matrix von Stützwerten entworfen. Sie arbeiteten z. T. mit einem Messrollen-Raster auf mehreren parallelen Walzen (Abb. 89). Vornehmlich sollte aber ein elektromechanisches Verfahren für die Kristallstruktur-Synthese ausgearbeitet werden (s. B.8.2). In der Literatur wurden zweidimensionale Anordnungen von vielen Kurbelschleifen erörtert [5] und andere Verfahren [6].

Stetige Überlagerung in der Fläche ließ sich z. B. erreichen durch optische Summation der Lichtmengen, welche von den im richtigen Winkel gedrehten Dianegativ-Bildern der Teilwellflächen (Abb. 90) durchgelassen werden. Dabei sind die Amplituden durch die sinusförmig zu- und abnehmende Schwärzung wiederzugeben. Jedes Dia hatte also Ähnlichkeit mit einem unscharf abgebildeten Lattenzaun und war auch so herzustellen.

Bragg [7] hatte dabei die Koeffizienten durch die Belichtungszeit des Fotopapiers (unter Berücksichtigung der Schwärzungskurve) realisiert und die Phasenlage der Teilwellen eingestellt. Es entstand so ein anschauliches Bild der Ergebnisfläche (Abb. 91), das aber kaum den Wünschen nach Genauigkeit entsprechen konnte.

Noch um 1957 arbeitete das Stanford Research Institute, Menlo Park Ca., mit der optischen Überlagerung von solchen Strichgittern, wozu die Dia- Auswahl und -Schwenkung sowie die Belichtungsdauern nach den gemessenen Diagrammwerten selbsttätig eingesteuert wurden [8].

Noch anschaulicher aber noch ungenauer war es, die Teilwellen als Gitter zu realisieren, durch deren Schlitze Sand rieselte [9]. Das entstehende Dünengelände entsprach im Groben der Dichteverteilung in der gewählten Ebene, gab aber bestenfalls ein Anschauungsmodell.

Dreidimensionale, d. h. räumlich wiedergegebene Synthese wäre zwar gerade für die anschauliche Darstellung der Kristallstruktur sehr nützlich, ist aber erst möglich geworden nach dem Vorhandensein von Großcomputern mit der Programmierung von virtuellen Schnitten und räumlichen Bildern.

A.8. Gezeitenrechner

Das Herausgeben von Tidentabellen, d. h. Tabellen des wechselnden Wasserstands abhängig von Ebbe und Flut für alle wichtigen Häfen war eine für die Sicherheit der Schifffahrt bedeutsame Aufgabe. Für die Marine wurde das noch wichtiger, da die Unterseeboote auch in fremden seichten Küstengewässern operierten und dafür möglichst genaue Unterlagen über die Wassertiefen nicht nur in Häfen und deren Zufahrten brauchten. Die wissenschaftliche Auswertung der langfristig gesammelten Aufzeichnungen und neue Erkenntnisse über die Einflüsse des Umlaufs von Mond (Normalgezeiten), Sonne (Springtiden), ferner von Wind (Sturmflut) und der jetzt besser bekannten unterseeischen Geographie ermöglichte dann, die Koeffizienten der Fourierreihen der Gezeiten festzulegen und Tidentabellen für alle Küstenorte lang im Voraus zu berechnen.

Schon 1867 hatte Lord *Kelvin* das Zerlegen der periodisch wiederkehrenden Wasserstandswerte in die Partialtiden vorgeschlagen; diese Koeffizienten wurden 1883 für eine Reihe von Häfen veröffentlicht. 1872 ließ er ein Modell für die Überlagerung von 8 Partialtiden bauen; noch im gleichen Jahr wurde danach eine Gezeitenrechenmaschine für 10 Tiden zu bauen begonnen, die ab 1873 in Betrieb ging. Später wurde die Synthese ergänzt durch die Überlagerung der 1. Ableitungen der Harmonischen, um die genauen Zeiten für Hoch- und Niedrigwasser besser zu erhalten als sie aus den Überlagerungskurven abzugreifen waren; ferner wurden Druckwerke angefügt.

Das Deutsche Hydrographische Institut in Hamburg erhielt 1915-16 einen großen Gezeitenrechner (Abb. 92) von der Firma TOEPFER & SOHN / Potsdam-Babelsberg (Konstrukteur *Reipert*), später FA. ASKANIA, nachdem Deutschland nicht mehr mit Tidentabellen aus England beliefert wurde.

Die Sinus- und Kosinus-Komponenten wurden mit justierbaren Kreuzschleifen nachgebildet, die Amplituden mit Stahlband summiert und die Summe aufgezeichnet und/oder tabellarisch ausgedruckt. 20 Tidengetriebe lieferten die Wasserstände für ein Jahr, aufgezeichnet auf einer Papierbahn von 50 cm Breite und 200 m Länge [1]

Eine weitaus größere Anlage für 64 Tiden (Abb. 93) wurde 1935-38 von der Firma AUDE & REIPERT MECHANOPTIK / Potsdam für *Prof. Rauschelbach* / Hamburg [2] und noch 1953-55 vom VEB KARL MARX WERK / Potsdam für Rostock gebaut.

Rauschelbach entwarf übrigens auch eine kleine transportable Gezeitenrechner Maschine für 10 Tiden, die den Schiffen mitgegeben werden konnte.

Ähnlich große Gezeiten-Überlagerer waren natürlich auch in anderen Ländern mit Seefahrt-Interesse in Betrieb (Abb. 94) [Fifer Bd. IV, S.969] und [3,4].

A.9. Anschauungsmodelle und Simulatoren

Nachbildungen und Simulationen sind analoge Widerspiegelungen eines technisch-wissenschaftlichen Problems, das in seiner ursprünglichen Darstellungsform entweder unanschaulich oder messtechnisch schlecht erfassbar ist, in einer anderen Form, die dem Begreifen und Messen zugänglicher ist. Es ist also eine ‚funktionelle Analogie‘ im Gegensatz zur ‚mathematischen Analogie‘, die den vorher besprochenen Integriergeräten zu Grunde liegt.

Die Grenze zum analogen Rechenggerät ist fließend; manche der Nachbildungen dienen mehr der rechnerischen Erfassung, andere mehr der Veranschaulichung und damit didaktischen Zwecken.

Wenn ein analoges System (oder auch ein Analogrechner) genauso schnell läuft wie das primäre, dann kann es an dessen Stelle treten und ggf. in das Gesamtsystem eingebaut werden. Das erlaubt das Erproben teurer und gefährlicher Vorgänge an einem echten Simulator. Bekanntestes Beispiel hierfür ist die Piloten-Ausbildung im Flugsimulator am Boden.

A.9.1. Demonstrationsmodelle

Solche Geräte sollen neue oder schwer einsehbare Gedanken und Systemabläufe anschaulich begreifbar machen. Das war dringlich beim Wiederentdecken des heliozentrischen Systems gegen die traditionsgeheiligte Vorstellung der Erde als Mittelpunkt des Universums. *Kepler* skizzierte 1596 ein Modell zur Planetenbewegung um die Sonne. Besonders bemerkenswert ist aber ein Gerät von *Wilhelm Schickard* (1592-1635), das er für sein Portrait (1632) entwarf und mit dem in der Hand er Modell stand. *L. von Mackensen*

/ Kassel baute (1979) dieses Handplanetarium nach und entdeckte dessen Doppelfunktion: durch Umstecken der Handkurbel konnte sowohl der traditionelle Umlauf von Sonne und Mond um die zentrale Erde nachgebildet werden als auch das neue kopernikanische heliozentrische System [1].

Zwei Modelle für die Vorlesung ‚Mathematik für Ingenieure‘ von *Prof. A. Walther* seien angeführt als Beispiele dafür, wie er den Ingenieurstudenten die theoretischen Erkenntnisse deutlich aufzuzeigen bestrebt war:

A.9.1.1. Schwingungsschreiber zur Veranschaulichung des Resonanzverhaltens

Er wurde um 1937 am Institut für Praktische Mathematik IPM der TH Darmstadt (*Prof. A. Walther*) gebaut, um in der Vorlesung eine deutliche Demonstration mit Aufschreibung des Schwingungsverhaltens bei Erregung mit verschiedenen Frequenzen und Frequenzgemischen zu ermöglichen (Abb. 95).

Ein auf Schienen laufender beiderseits federnd gehaltener Wagen als Masse wurde durch einen motorisch angetriebenen Kurventrieb zu erzwungenen Schwingungen gebracht; als Triebkurven dienten eine in Polarkoordinaten wiedergegebene reine Sinuswelle, eine Dreieckskurve als Überlagerung von Sinuswellen, und andere Kurvenscheiben. Die Wagenmasse war mit einem Tinten-Schreibröhrchen versehen, das die Amplituden auf eine breite, mit konstanter Geschwindigkeit hochgezogene Papierbahn schrieb. Bei Übereinstimmung der oder einer der überlagerten Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Feder-Masse-Systems wurde die Resonanz deutlich im Schrieb aufgezeichnet.

A.9.1.2. Mechanisches Kettenleitermodell

Es wurde 1938 am IPM von *W. de Beauclair* gebaut, um die unterschiedlichen Verknüpfungsarten zwischen den Gliedern elektrischer Kettenleiter anschaulich zu machen und deren Wirkungsweise als Filter, Hoch- oder Tiefpass deutlich vorführen zu können [2]. Auch hier war zur Demonstration vorgesehen, mittels einer Schreibeinrichtung die Amplituden der Schwingung an den Kettengliedern aufzuzeichnen (Abb. 96).

Als Antrieb an einem der Endglieder der Filterkette diente ein Schwingungsgeber, der wahlweise reine Sinuswellen oder auch mittels Kurvenscheiben beliebige Überlagerungen von Erregerfrequenzen anzulegen erlaubte. An beliebiger Stelle der Kette konnten Dämpfungs- und Reibungsglieder eingesetzt werden zur Leistungsabnahme, vorzugsweise am Ende. Als Kopplungsglieder dienten Glieder mit Feder- oder Massen / Trägheits-Elementen. Die aus Spielzeugeisenbahn-Wägelchen aufgebaute mechanische Filterkette lief auf drei parallelen Gleisen, weil die Trägheitskopplung eine solche versetzte Anordnung verlangte. Als Schreibeinrichtung war eine Funkenstrecke vorgesehen, die reibungslos und ohne Rückwirkung (aber Radio-störend) schwarze Lochspuren auf ein breites Papierband schrieb. Die Amplituden waren so zum Ausmessen und zur rechnerischen Überprüfen zugänglich. Das Modell und die grundlegende Studienarbeit wurden am 11.9.1944 bei der Bombardierung Darmstadts zerstört.

A.9.2. Simulationsmodelle und –verfahren

zur messtechnischen Auswertung von rechnerisch schwer lösbaren Problemen.

A.9.2.1. Gummimembran-Modelle

Hier werden elastische Membranen aus Gummi über einen Rand mit unterschiedlichem Höhenprofil, den Randbedingungen des Problems entsprechend, und ggf. auch über innere Stützpunkte oder -figuren gespannt. Die sich bildende Form der Membran bildet die Lösung

der zu Grunde liegenden partiellen Differentialgleichung, d. h. des Spannungszustandes oder des Potentialfeldes nach [3,4].

A.9.2.2. Seifenhaut-Modelle

dienen den gleichen Aufgaben, nur in kleineren Maßstab.

A.9.2.3. Spannungsoptische Modelle aus flachen Scheiben aus Plexiglas

und dergl. transparentem Material wurden zum Sichtbarmachen und Überprüfen von mechanischen Spannungen in Maschinenteilen herangezogen; in polarisiertem Licht erscheinen Flächenteile gleicher Belastung in gleicher Farbe (Abb. 97).

A.9.2.4. Zur Bearbeitung von Schwingungsproblemen,

die nur durch partielle Differentialgleichungen zu beschreiben und einer rechnerischen Lösung schwer zugänglich waren, baute um 1943 eine Luftfahrt-Forschungsstelle analoge schwingungsfähige Modelle als ‚Pendel am Pendel‘ oder ‚Umlaufende Masse am Pendel‘, die erregt und deren Verhalten elektrisch gemessen wurde.

A.9.2.5. Nachbildung der Hundekurve

In der großen Halle der Deutschen Forschungsstelle für Segelflug DFS in Ainring wurde um 1943 zur Schulung der Piloten für eine ferngelenkte Gleitbombe HS 239 der Firma HENSCHEL ein Übungsmodell für ‚Hundekurven‘-Nachsteuerung [6] aufgebaut. Im einfachsten Fall spurt eine Rollfigur, die ein Hund an einer Leine hinter sich herzieht, eine Hundekurve. Diese gedachte Leine kann zeitabhängig kürzer werden, dann erreicht der Hund sein Herrchen. Er kann aber auch frei seinem Herrn zueilen, immer ihn im Blick (Abb. 97 b). Ein Jäger, der mit Vorhalt zielt, weiß, dass er vor dem Ziel vorbei schießt, wenn dieses unvermittelt stehen bleibt. In Ainring sollte ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrendes und lenkbares Wägelchen, das eine Fernsehkamera trug, auf das frei in der Halle natürlich langsamer fahrende Ziel gesteuert werden, wobei der Pilot im abdrehenden Bomber eben nur das Fernsehbild des Zieles zu sehen bekam. Dieses zweidimensionale Modell der dreidimensionalen Flugbahn der Gleitbombe erwies sich für die Ausbildung des 'Bildschirm-Piloten' als sehr förderlich.

B. Elektromechanische Analog-Geräte

Elektromechanische Analoggeräte sind solche Geräte oder Rechenanlagen, bei denen die elektrischen Bauelemente nicht nur prinzipiell unwesentlichen Hilfsfunktionen dienen, sondern für die Lösung der Aufgabenstellung mit ausschlaggebend sind.

Während bei mechanischen Geräten Drehen und Verschieben von Wellen und Gestängen aller Art Eingabe- und Messgrößen sind, sind hier im Allgemeinen Strom und Spannung, mit Messgeräten zu messen, sowohl Argument als auch Ergebnis.

B.1. Funktionsgeneratoren und Kurvenabtaster

B.1.1. Zum Eingeben von einzelnen Funktionswerten,

hier also von bestimmten Spannungen, dienten meist ein oder mehrere einstellbare Potentiometer-Abgriffe.

Im speziellen Fall des Erzeugens eines Sinuswertes in Abhängigkeit vom Drehwinkel wurde ein Drahtwiderstand kreisbogenförmig gebogen und mit einem exzentrisch gelagerten Schleifkontakt abgegriffen. Bei den optimalen Maßverhältnissen (Abb. 100) war der Fehler vom richtigen Sinuswert im mittleren Bereich 0,1 - 0,2 %, in den 180°-Stellungen bis auf 5 - 10 % steigend [1,2].

B.1.2. Das Eingeben von Werten aus stetigen Funktionen

Falls diese nicht durch eine Differentialgleichung definierbar war, konnte sie durch ein approximierendes Polygon ersetzt werden; gegebenenfalls durch einen mit mehreren Shuntwiderständen bestückten linearen Widerstand, der abgegriffen werden konnte (Abb. 101).

Dieses Polygon konnte auch durch eine Kette von 5 - 30 vorgespannten Dioden (jeweils mit einem entsprechend bemessenem Widerstand) und einem Operationsverstärker gebildet werden.

Drehfeldgeber (Synchros, FÜ-Systeme, ‚Selsyn‘) mit Speise-Frequenzen von 500 bis 1000 Hz waren zur Erzeugung von Sinus- /Cosinus Funktionswerten dienlich (s. B.8). Eine der drei Statorwicklungen gab den Sinus, die beiden anderen zusammen den Cosinus des Drehwinkels des zweipoligen Rotors.

Im Allg. aber wurden Funktionswerte durch das Abtasten von aufgezeichneten Kurven eingegeben. Falls das nicht einfach manuell von einer Bedienungskraft (Abb. 102) erfolgte, geschah es meistens lichtelektrisch mit den ab den dreißiger Jahren verfügbaren (Selen-) Photozellen. Entweder wurde ein Lichtspalt in Ordinatenrichtung ausgeleuchtet und die Lichtmenge gemessen, die von der als Silhouette davor (Abb. 113) vorbeilaufenden Kurve nicht verdunkelt wurde oder es wurde ein Lichtpunkt der Kante des Tuschestriches entlang gesteuert (Abb. 70). Dabei sollte er möglichst ohne Pendelung auf halb hell – halb dunkel bleiben. Ein zusätzliches Einregeln der Tangentenrichtung wäre dafür zweckmäßig gewesen, unterblieb aber meist als zu aufwendig. Vorher gab es mehrere Geräteentwicklungen, bei denen z. B. ein stromführender Draht auf den Kurvenstrich aufgeklebt wurde und zwei Fühler

rechts und links von ihm das elektrische Feld erfassten oder gar nur bei Berührung reagierten.

Erste große Anwendungen gab es ab 1940 bei den großen Integrieranlagen (Abb. 71), später insbesondere bei den nach einer Zeichnung gesteuerten Werkzeugmaschinen. Die oft krummlinig begrenzten Bleche beim Schiffbau wurden mittels derartiger Brennschneidmaschinen hergestellt.

Das Eingeben von Werten aus Funktionen zweier unabhängiger Variablen erfolgte mit Geräten zum Abtasten von Funktionskörpern (Abb. 103). Ein Abtaststift wird zweidimensional über den Kurvenkörper eingestellt und dann langsam bis zur Berührung und Kontaktabgabe abgesenkt [3].

B.1.3. Ausgabe

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte mittels

- a) schreibender Messgeräte als Kurvenschrieb
- b) Digitalvoltmeter oder dergl. in groß lesbaren Ziffern, oder mit
- c) Koordinaten-gesteuerten Zeichenmaschinen (Plottern), (Abb. 130).

B.1.4. Übertragung von Drehungen und Winkelstellungen

Zur nichtmechanischen Übertragung von Drehungen bzw. Winkelstellungen waren vorwiegend Drehfeld-Synchros (FÜ-Systeme) eingesetzt worden. Diese hatten drei um 120° versetzte Wicklungen und einen zweipoligen Rotor. Der Rotor des Folgegerätes stellte sich entweder synchron laufend auf die Winkelstellung des Gebers ein oder er wurde mittels einer Servo-Schaltung zwangsläufig nachgeführt.

Zum rückwirkungsfreien Verstärken und Weiterleiten von Drehungen haben sich vorher auch andere Winkelvergleicher in der Praxis der Analoggeräte bewährt; so waren z. B. bei den späteren Integrieranlagen von V. Bush ein lichtelektrischer Vergleich der Drehstellungen von Polaroidfiltern im Geber und Nachfolger eingebaut. Auch Nachsteuerung der Rotation durch kapazitive Messung der gegenseitigen Stellung von zweckmäßig geformten Flügeln zweier Drehkondensatoren war gebaut worden.

B.2. Elektromechanische Rechenbaugruppen

Die Grundoperationen Addieren und Subtrahieren sind elektrisch durch Zusammenschalten einfach zu bewerkstelligen. Multiplikation von Stromstärke- und Spannungswerten ist durch anzeigende Leistungsmesser, besser durch schreibende Messgeräte zu erledigen. Auch einstellbare Kapazität (mit Drehkondensatoren) und angelegte Wechselspannung ergibt einen dem Produkt beider Werte proportionalen Strom [1]. Falls das Produkt $g(x) \cdot h(x)$ anschließend integriert werden sollte, konnte ein Multiplikator dadurch erspart werden, dass zwei Integrationen nach $g(x)dh(x)$ und $h(x)dg(x)$ parallel ausgeführt und ein Addiergerät nachgeschaltet wurde (Abb. 104), um das Integral als Summe beider Ergebnisse zu erhalten. Integrierende Baugruppe war oft ein Wattstundenzähler. Er wurde in Großserie hergestellt und war zuverlässig. Für Rechenprobleme war zwar die Genauigkeit nicht ausreichend, wohl aber für viele Simulationsaufgaben.

Auch spezielle trägheitsarme Motoren mit sehr leichten Glockenankern aus gezogenem Aluminiumblech (solche sog. ‚Ferraris‘-Motoren wurden für den Drehmomentverstärker der DGM IPM-OTT vom IPM selbst hergestellt) und mit freitragenden Rotor-Wicklungen kamen zum Einsatz.

Im Übrigen dienten motorgetriebene selbstabgleichende Brückenschaltungen als Rechenbaugruppen, und Relais bzw. Schrittschaltwerke und Hebdrehwähler zur Auswahl und Ansteuerung von wahlweise anzuschließenden Bauelementen oder Baugruppen.

B.3. Anlagen zum Lösen von Gleichungen

B.3.1. Lineare Gleichungssysteme

Systeme von linearen Gleichungen ersten Grades bzw. Determinanten wurden nach einigen Vorschlägen und Mustergeräten durch zweidimensionale Anordnungen von Schaltelementen wiedergegeben [1]. Jeder Knoten war auf den zugehörigen Beiwert einzustellen, und die Knoten, die zu einer Gleichung gehören, in Reihe zu schalten. Durch Messen von Strom- bzw. Spannungswerten wurden die Unbekannten ermittelt. Große Bedeutung hatten diese Matrix-Schaltungen u. a. für die Bemessung und Überprüfung von elektrischen Leitungsnetzen gefunden, insbes. bei Gas- und Wasser-Rohrnetzsystemen. Sie waren im Grunde Nachbildungen und werden deshalb auch im Abschnitt B.9 ‚Simulatoren‘ angeführt.

- a) Beispiel für ein großes Rohr-Netzmodell sei eine russische Anlage, die Erdölfelder überwachte. Sie wurde gebaut vom Unionsforschungsinstitut für Erdöl und Erdgas der UdSSR. Sie sollte die optimale Verteilung der Förderung von bis zu 750 Bohrlöchern ermitteln, wenn in 20 000 Knoten die Parameter entsprechend den Annahmen bzw. Forderungen über die bekannten Lagerstätten-Kapazitäten, über Druckgefälle, Liefermengen usw. eingegeben waren. Die Anlage beanspruchte 200 m² Grundfläche und 6-8 Personen zur Bedienung.
- b) In einem Gerät von *M. Reck* [2]) wurde jeder Gleichung eine eigene Schaltgruppe zugeordnet; gleichindizierte Beiwerte wurden durch regelbare Widerstände dargestellt, die gemeinsam eingestellt wurden (Abb. 105). Das entsprach in etwa der Kupplung der Platten im mechanischen Gerät von *Wilbur* (s. A.3.2.1), (Abb. 22).
- c) Ein Gerät von *Mallock* (1933) verwendete Ringtrafos mit mehreren Spulen, deren Windungszahlen den Beiwerten in der Gleichung (durch dreistufig einstellbaren Abgriff oder Austausch) proportional gemacht wurden. Die gesuchten Werte der Unbekannten wurden als Spannungen gemessen [3], (Abb. 106).
- d) Industriell hergestellt wurde das Gerät CEC 30-103 von CONSOLIDATED ENGINEERING CORPORATION, Pasadena /Calif. USA. Es diente zum Auflösen von linearen Gleichungssystemen in der Massen- und Infrarot-Spektroskopie. Es lieferte die Unbekannten von max. 12 Gleichungen mit vierstelligen Koeffizienten und rechten Seiten nach dem Iterationsverfahren von Gauß-Seidel durch Potentiometer-Abgleich. Es war schnell und bequem zu bedienen. Mehrere Mitarbeiter von *Prof. Walthers* IPM hatten um 1953 erprobungshalber 6 Gleichungen mit 6 Unbekannten auf der Anlage der Badischen Anilin- und Sodafabrik BASF in Ludwigshafen bearbeitet [4]. Die Maschine wurde ab 1954 nicht mehr produziert.

B.3.2. Algebraische Gleichungen

mit einer Unbekannten in steigenden Potenzen wurden ebenfalls mit elektromechanischen Analoganlagen zu lösen versucht.

- a) *Hart-Travis* hatte vor 1938 Wechselstromgeneratoren so zusammengebaut [5], dass die Rotoren auf gemeinsamer Achse mit gleicher Drehzahl liefen, ihre Ständer jedoch einzeln (durch ein Zahnradgetriebe) um jeweils ein Vielfaches gegeneinander verdreht werden konnten. Die so erzeugten Spannungen gleicher Frequenz und Amplitude waren somit phasenverschoben. Sie wurden jeweils an Potentiometer

aufgeschaltet, deren Schleifkontakte ihrerseits mittels Kurvenscheiben um Potenz-Vielfache motorisch verschoben wurden (Abb. 107). Durch Variation von Drehwinkel = Phase und Potentiometer-Abgriff von Hand musste versucht werden, die Gesamtspannung zu Null zu machen. Das habe für eine Gleichung 8. Grades etwa eine halbe Stunde gedauert und zu Ergebnissen mit Genauigkeiten von 1 % bis 2 % geführt. Diese Maschine wurde an der Moore School of Electrical Engineering in Philadelphia / USA und auch beim Research Committee of Aeronautics / GB gebaut.

- b) An der Universität Wien wurde von *Hörner* und *Zemanek* 1953 eine eigentlich vollelektronische Analog-Anlage zum Auflösen von algebraischen Gleichungen bis zum 6. Grad gebaut [6]. Nur weil zweimal sechs genau gleichlaufende Potentiometer zur stetigen Variation der Variablen z für das Polynom $f(z) = \text{Summe aller } a_0 + a_n z$ handelsüblich nicht zu beschaffen waren, wurden Ketten von genau abgeglichenen Festwiderständen eingebaut, die in Stufen von 0,1 bzw. 0,01 für den Argumentbereich für z von 0 bis 1 mittels sich fortschaltender Drehwähler (deswegen wird sie hier angeführt) in Folge abgegriffen wurden. Gegengekoppelte Röhrenverstärker dienten zum Addieren, Potenzieren von z und zum Multiplizieren mit den Koeffizienten a_n . Wenn beim selbsttätigen Durchdrehen der Wähler eine Nullstelle erreicht wurde, schaltete sich die Anlage zum Notieren des Wertes ab (Abb. 108).
- c) Auch Drehpotentiometer und Drehfeldsysteme („Selsyn“) liefern Spannungen nach Sinus- bzw. Cosinus-Funktionen, und sie können in ähnlicher Weise zum Lösen von algebraischen Gleichungen dienen.

Dietzold-Mercner / BELL TELEGRAPH CO. / USA sowie *Brown* und *Wheeler* [11] haben Anlagen dieser Bauart um 1941 entwickelt.

Die in B.8 beschriebenen Geräteentwürfe des Autors zur zweidimensionalen Fouriersynthese ließen sich bei geringer Erweiterung um Potentiometer auch für diese Aufgabe herrichten.

Eine interessierende Aufgabe war auch das Problem der Warteschlangen vor Büroschaltern, Produktionsmaschinen und dergleichen. Hierfür wurden spezielle Analogrechner oder besser Simulationsanlagen gebaut [8], ebenso wie für die Produktionsplanung und -optimierung.

Die hier nur in Beispielen kurz angedeutete Vielzahl von Entwürfen und Probegeräten zeigt erneut auf, welche Bedeutung das Lösen solcher speziellen mathematischen Probleme in der Praxis hatte, und wie groß der Aufwand sein musste. Im Gegensatz zu den fast serienweise hergestellten Planimetern und ähnlichen Instrumenten waren es hier Einzelentwicklungen in Instituten, die damit ihren Eigenbedarf zu decken bemüht waren. Erst mit den programmierbaren Digital-Computern wurde das mit numerischen Iterationsverfahren schnell und bequem durchführbar.

B.4. Differenzierschaltungen

Wie bereits in A.4 erläutert, liegt der Aufgabe des Differenzierens stets eine Tendenz zum Aufräumen inne. Das ist bei graphischen diskreten Verfahren auch durch gutes Zeichnen kaum zu beheben, bei mechanischen Geräten nur auf Kosten der Geschwindigkeit des Einspielens der ‚Wetterfahne‘ nach (Abb. 25), und bei elektrischen Schaltungen zeigt es sich durch Instabilitäten. Jeder Differentiator hat die Neigung, Störfrequenzen wie das Netzbrummen stark hervorzuheben; daher lässt sich eine Anlage zur Lösung von Differentialgleichungen nicht mittels noch so ausgefeilter Differentiatoren aufbauen, nur mit Integratoren.

Realisiert wurden Differenziervorgänge, falls unumgänglich, mittels Tachogeneratoren, Servoschaltungen mit Potentiometern, Operationsverstärker, (s. C.1.3. u.a.) [1].

B.5. Elektromechanische Integratoren

B.5.1. Elektro-optische Planimeter

B.5.1.1. Lichtelektrisches Planimeter

Zur Bestimmung der Fläche von größeren Objekten, wie ganzen Häuten oder Lederstücken, wurde ein lichtelektrisches Planimeter gebaut. Das Leder deckte dabei eine durchleuchtete Glasplatte teilweise ab; gemessen wurde die Minderung der Lichtmenge in einem lichtdichten Gehäuse mittels einer Fotozelle [1].

B.5.1.2. Gerät zur Bestimmung von Flächen in Landkarten

Ähnlich wirkte ein Gerät zur Bestimmung von Flächen in Landkarten, insbesondere von Flurstücken, die einem bestimmten Besitzer gehören aber verstreut liegen [2]. Hier wurden die zusammengehörenden Flächenstücke geschwärzt, die Karte dann auf eine durchleuchtete Glastrommel gespannt und nicht transparente Flächen bei deren Drehung streifenweise lichtelektrisch abgetastet und summiert. Dieses von *H. Stubbe* entwickelte Gerät diente beim Auswerten von Flurbereinigungskarten zum Bestimmen von Besitzständen nach Wertklassen und Sonderklassen. Die Trommel rotierte mit 80 U/min, der abtastende Lichtspalt war 0,2 mm breit.

B.5.2. Elektromechanischer Fahrzeitrechner

Zur Ermittlung der Eisenbahn-Fahrzeiten gemäß der Lokomotiv-Zugkraft und dem durch das Streckenprofil gegebenen Fahrwiderstand diente ein von *Prof. E. Bradshaw* der Universität Manchester / GB vor 1958 für die Britische Eisenbahn Zentrale entworfenes Gerät mit zweifacher Integration. Das Streckenprofil der Karte wurde mit elektrisch leitender Farbe nachgezeichnet, und zwei Fühler beiderseits des Striches gaben Kontakt mit ihm und steuerten so den Antriebsmotor für die Spindel des Ordinatenvorschubs, wodurch Steigung bzw. Gefälle dem Integrator eingegeben wurde. Die Zugkraft der Lokomotive wurde durch die Lochung eines Streifens dargestellt, die durch Kontaktgabe unterschiedliche Trafostufen einschaltete. Die Integration erfolgte mit zwei Wattstundenzählern; lichtelektrischer Abgriff der Drehung der mit Skalenstrichen versehenen Zählerscheibe übertrug das Ergebnis auf Zählwerke und -Drucker [3].

B.6. Elektromechanische Integrieranlagen

„Differentialgleichungsmaschinen“ DGM mit stetig arbeitenden mechanischen Integratoren wurden in A.6 behandelt, auch wenn sie zur Drehwert-Übertragung sowie zur Kurvenabtastung und Drehmomentverstärkung ggf. elektrische Baugruppen enthielten, weil die maßgeblichen rechnenden Bauteile rein mechanisch arbeiteten.

Wirklich elektromechanisch arbeiteten vorwiegend Wechselstromrechner [1], die aber mit Servo-gesteuerten Potentiometern, Drehkondensatoren und Tachogeneratoren relativ geringe Arbeitsgeschwindigkeiten aufbrachten.

Sie wurden für spezielle Aufgaben, z. B. in Steuer- und Regelkreisen, gebaut. Ihr Vorteil lag in der driftfreien Verstärkung; dieser schwand mit der Entwicklung des Chopper-stabilisierten Gleichspannungs-Operationsverstärkers.

B.6.1. Integrieranlagen

Vannevar Bush, der Pionier der Integrieranlagen, hatte ab 1920 auch mit Wattstundenzählern als Integratoren experimentiert, fand sie aber zu ungenau. Nach dem so erfolgreichen und als Vorbild dienenden mechanischem Differential Analyzer baute er eine neue Anlage wieder mit vorerst 18 Reibrad-Integratoren, aber nun mit freizügiger elektronischer Drehwert-Übertragung mittels kapazitiver Drehflügel-Nachfolgeschaltungen und mit Koppeltafel. Dafür und für die Plotter (Zeichentrommeln) usw. waren insgesamt 2000 Röhren in den Verstärkern erforderlich [2]. Zur Einstellung und Kopplungsvorgabe dienten Lochstreifen (Abb. 109).

Die Firma CONTRAVES AG / Zürich baute um 1955 den elektromechanischen Integrator IA 55 (Abb. 110) mit Relais-Verstärker, mit Integrier-Einrichtungen als drifffreie Folgemotoren, die durch ‚Rechenkondensatoren‘, die auch Addieren und Subtrahieren, Multiplizieren und Dividieren konnten, elektrisch (400 Hz) verkoppelt waren [3a, b]. Die Anlage hatte eine Kreuzschienen-Stecktafel und Genauigkeit um 0,1%.

CONTRAVES baute darauf weiterentwickelnd die Modelle IA 58 sowie ab 1959 die Modelle MIA-850 und Intrasond [4].

Auch die HOCHSCHULE FÜR ELEKTROTECHNIK in Ilmenau / DDR baute 1959 eine elektromechanische Integrieranlage.

Eine Mittelstellung zu den ab 1950 entstehenden rein elektronischen Analogrechnern war die elektromechanische, mit diskreten Impulsfolgen analog aber nicht stetig arbeitende Integrieranlage. Sie fand nur kurzzeitig Interesse, weil sie zwar anfangs viel billiger aber relativ langsam und nur dann genauer war als die dann aufkommenden und schnell fortentwickelten elektronischen Analogrechner (s. C.2), wenn große Stellenzahlen vorgegeben werden mussten.

B.6.2. INTEGROMAT

Der INTEGROMAT ist ein mit diskreten Impulsfolgen integrierender Analogrechner. Er wurde 1949-1953 von Dr. H. Bückner entwickelt [5], der schon die Integrieranlage bei der FA. ASKANIA und den Groß-Analogrechner MINDEN entworfen hatte, mit dem Ziel, auch den Instituten, die keine Millionenbeträge für eine Integrieranlage ausgeben konnten, eine erschwingliche Hilfe anbieten zu können. Bei vielen wissenschaftlich-technischen Aufgaben kam es ja auf hochgezüchtete Genauigkeit nicht unbedingt an.

Im Kontrollratsgesetz vom 29.4.1946 waren elektronische Entwicklungen strengen Auflagen unterworfen. Die britische Besatzungsbehörde genehmigte nur eine solche halbmechanische mit Impulsfolgen integrierende Anlage.

Eine einzige Ausführung des INTEGROMAT wurde von der Firma SCHOPPE & FAESER GMBH / Minden gebaut und am 1.12.1953 zuerst am INSTITUT FÜR ANGEWANDTE MATHEMATIK / INSTITUT FÜR SCHIFFBAU an der UNIVERSITÄT HAMBURG bei Prof. L. Collatz in Betrieb genommen. Erster Abschätzung zufolge sollte sie nur um 60 000 DM kosten.

Gegenüber den mechanischen ‚Differentialgleichungsmaschinen‘ war der INTEGROMAT einfacher und billiger zu bauen, aber weniger genau; wesentlich kleiner und einfacher zu bedienen, doch nicht für stetig variable Drehwinkel ausgelegt sondern für einen gequantelten Integranden, nämlich mit einer abzählbar diskreten Anzahl von positiven oder negativen elektrischen Impulsen arbeitend (Abb. 111).

Wie beim mechanischen Analogrechner war die Arbeitsweise vollständig simultan und parallel, d. h. es waren so viele Recheneinheiten gleichzeitig tätig zusammengekuppelt, wie zur Bearbeitung der Differentialgleichung notwendig waren; dies erfolgte über eine zentrale Schalttafel mit einpoligen Steckschnüren. Daher war die Programmierung ebenso einleuchtend wie bei den mechanischen Integrieranlagen.

Die Eingangsfunktionen wurden durch einen Lochstreifen vorgegeben; der Ordinatenzuwachs je Abszisseneinheit wurde darin eingestanz.

Dieser Lochstreifen steuerte einen Schrittmotor, dieser wählte je nach seinem Vorschub einen von 28 Abgriffkontakten an einer Kontaktwalze mit gestaffelt 0 bis 27 kontaktgebenden Zähnen und sandte derart je nach seiner Stellung eine entsprechende Impulsfolge aus (Abb. 112a und 112b).

Die Kontaktwalze wurde als Muttersender für die unabhängige Veränderliche mit fester Drehzahl oder als Tochter-Impulsgeber von einem Impuls-getriebenen Schrittmotor in Drehung versetzt. Die abgegebene Impulsfolge war daher proportional zum Produkt Zähnezahl x Drehzahl.

Die Summentriebskette addierte 4 Eingänge in Form von Schrittmotoren mittels 4 Kegelrad-Differentialen und gab die Summe als Impulsfolge aus. Die Ergebnis-Zählwerke waren vierstellig; eine Zeichentrommel erlaubte graphische Ergebnis-Ausgabe mit ca. 20 cm Schreibbreite. Die Arbeitsgenauigkeit betrug etwa 1%.

Das ausgelieferte Exemplar hatte 18 Integratoren, 3 Addier- und 12 Funktionsgeber mit Lochstreifenabtastung [6].

Der Mathematiker *Dr. H. Bückner* hatte mit seinem technischen Gestaltungsvermögen die mechanischen Integrieranlagen zu höchster Leistung entwickelt, aber – ähnlich wie *Bush* / MIT und andere Konstrukteure – nicht den Mut oder die wissenschaftliche Befähigung, voll in das brandneue Gebiet der elektronischen Rechentechnik einzusteigen. Überdies waren die Nachkriegs-Zustände in Deutschland mit Geldmangel und Einflussnahme der Besatzungsmächte (mit Einschränkung der Entwicklungsarbeiten an Hochfrequenztechnik bei Firmen) kein guter Nährboden für den technischen Fortschritt. Auch die Gutachter der britischen Besatzungsbehörde, welche die Firma berieten, hatten für die Zukunft der Elektronik wenig Gespür. *Bückner* ging in die USA.

B.6.3. Digital Differential Analyzer

Digital-analoge Integrieranlagen in elektromechanischer Bauweise in der Art des INTEGROMAT, d. h. mit vielen parallel-simultan summierenden Bauelementen, wurden kaum weiter entwickelt [7,8]; die meistens in den USA entstehenden ‚Digital Differential Analyzer‘ DDA, z. B. MADDIDA, waren mit voll elektronischen Schaltkreisen ausgerüstet (s. C.2) und arbeiteten wegen der damit erreichbaren hohen Schaltfrequenzen seriell-sukzessive mit einem einzigen Integriermodul, aber dafür mit mehreren Speichern.

B.7. Harmonische Analyse von Schwingungsschrieben

Das in A.5.3.4 behandelte manuelle Nachfahren von gezeichnet vorliegenden Kurvenbildern mit Harmonischen Analysatoren war bei häufigerer Notwendigkeit lästig und zeitraubend. Vor allem, wenn serienweise Kurvenschriebe aus schreibenden Schwingungsmessgeräten zu analysieren waren, wurde es zweckmäßig, selbsttätige Geräte zu benutzen.

Methode der Wahl dazu war die lichtelektrische Wiedergabe des Kurvenbildes als modulierter Gleichstrom zum Erregen eines zur Resonanz fähigen Schwingspiegels (Abb. 113). Auf einen mit regelbarer Drehzahl umlaufenden, von innen durchleuchteten Glaszylinder war eine Periode der zu analysierenden Funktion in Form ihres Silhouettenbildes aufgespannt. Durch eine Spaltblende wurde eine Photozelle mit dem vom geschwärzten Kurvenbild nicht abgedeckten Lichtstrom belichtet. Deren Stromausgang wurde nach Verstärkung auf die Erregerspule einer federnden Schwingzunge geschaltet. Diese machte nur bei Erregung in ihrer Eigenfrequenz größere Resonanz-Ausschläge, die mittels eines Spiegels nach Art der Spiegel-galvanometer auf einer Skala zu beobachten

waren. Bei Drehzahländerung bildeten sich die in der Kurve enthaltenen Teilschwingungen als Maxima ab, die zugeordneten Drehzahlen entsprechen denen der Oberwellen [1].

An Stelle des Schwingspiegels kann auch ein elektrischer Schwingkreis aus Spule und Kondensator erregt werden; dann sind die Maxima des darin oszillierenden Stroms maßgebend für die Teilfrequenzen.

Das Multiplizieren der Kurvenordinaten mit Winkelfunktionen kann dadurch geschehen, dass der Photozellenstrom zum Durchleuchten eines zweiten Glaszylinders mit aufgespannter Sinuswellen-Silhouette herangezogen wird; bei regelbarer Drehzahl werden Maxima des durchtretenden Lichtstroms bei den vorhandenen Oberschwingungen messbar [2].

B.8. Elektromechanische Fouriersynthese

Wie in A.7 bereits dargelegt wurde, handelt es sich bei der Fouriersynthese um die Nachbildung von periodischen Funktionsverläufen durch Überlagerung von Sinuswellen.

B.8.1. Eindimensionale Fouriersynthese

Es war denkbar, alle Teilschwingungen durch ein optisches Verfahren zu überlagern, indem sie in Form von Sinus-Silhouetten (Abb. 114) mit einstellbarer Phasenlage auf umlaufenden Glaszylindern durchleuchtet wurden. Die jeweiligen Lichtstärken waren nach den Koeffizienten zu bemessen; das durchtretende Licht wurde auf einer Photozelle gesammelt und deren Ausgang auf einer Kathodenstrahlröhre als Syntheseschwingung sichtbar gemacht.

Besser erschien ein rein elektronisches Überlagern. Die Teilschwingungen konnten an Drehpotentiometern durch rotierende Bürsten abgegriffen werden [1,2].

Es war schon in B.3.2 erwähnt worden, dass mit Drehfeldgebern („Selsyn“) Sinuswellen erzeugt werden können; hier gibt eine der drei Statorwicklungen beispielsweise den Sinus als Modulation, während die beiden anderen zusammengeschaltet den Cosinus des Schwenkwinkels des zweipoligen Läufers darstellen. Die Koeffizienten der Fourierreihe werden durch Bemessung des die Statorwicklungen speisenden Wechselstroms (mit Trägerfrequenz 500 Hz) eingestellt. Bei langsamem Umlauf ergibt sich eine Modulation in Sinusform, deren Amplitude proportional der Summe der Läuferströme ist.

Zur harmonischen Synthese werden also mehrere Generatoren mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz angetrieben und ihre Ständer zwecks Einstellung der Phasenwinkel drehbar gelagert. Die so erzeugten Sinuswellen werden addiert und die Summe angezeigt [3].

Seit etwa 1940 waren *Braunsche* Röhren mit rd. 70 mm kleinen Schirmen als tragbare Oszillographen und ab 1945 Kathodenstrahlröhren mit weit größeren Leuchtschirmen im Handel. Sie konnten zur Darstellung der Überlagerung dienen. Vorher mussten Spiegel-Schleifenoszillographen dazu benutzt werden. Allerdings machte das US-Kontrollratsgesetz Nr. 23 vom 12.9.1949 bis zu dessen Stornierung in den Westzonen des besetzten Deutschland auch jede Verwendung von Oszillographen meldepflichtig.

B.8.2. Zweidimensionale Fouriersynthese

Für das Erkennen des inneren Aufbaus eines Kristalls aus seinen Ionen oder mit anderen Worten, der **periodischen Verteilung der Elektronendichte im Kristall** war es notwendig, eine zweidimensionale Fouriersynthese ausführen zu können (s. auch A.7.2) Für diese Aufgabe hat der Autor am IPM der TH Darmstadt im Auftrag von *Prof. Brill* und mit Anleitung

durch Dr. Witte / ZINTL INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE / TH Darmstadt um 1943 dieses Prinzip der elektrischen Frequenzmodulation in Erwägung gezogen [4].

Was bei nur eindimensionaler Überlagerung die Teilwellen in Sinusform $c_n \sin(2\pi n\varpi + \alpha)$ mit jeweils eigenem Phasenwinkel α und vervielfachten Frequenzen $n\varpi$ sind, ist bei zweidimensionaler Synthese als ‚Wellflächen‘ in einer x-y-Ebene aufzufassen (Abb. 115). Ein einzelner Summand hat die Formel $a_{hk} \cdot \cos 2\pi (hx + ky) + b_{hk} \cdot \sin 2\pi (hx + ky)$.

Die Indizes h und k geben die Perioden der einzelnen Wellflächen in Richtung der x- bzw. y-Achse an. Als Summe der gedanklich übereinandergelegten und zusammengestauchten Teilflächen entsteht eine in zwei Richtungen periodisch ‚hügelige‘ Fläche, die einem gebuckelten Eierkarton oder einer Pralinenpackfolie ähnlich sieht. Man darf jedoch die Amplituden nicht in z-Richtung räumlich ansteigend sehen, sondern sich etwa als Temperaturverteilung in der Ebene vorstellen.

Es gibt jedoch kein brauchbares Verfahren, die bei zweidimensionaler Überlagerung zu erhalten gewünschte ‚hügelige‘ Ergebnisfläche sichtbar darzustellen. Es bleiben allein ein optisches und ein ‚Sanddünen‘-Verfahren, die Anschauungsmodelle liefern können.

Genauere Ergebnisse lieferte nur der Ausweg, punktweise mit instrumentell ermittelten ‚Stützwerten‘ eine Art ‚Isothermen‘- oder Höhenschichtlinien-Bild zu erzeugen oder eine Vielzahl von nebeneinander liegenden Schnittlinien, um ein anschauliches Bild der Elektronendichteverteilung des Kristallgitters zu gewinnen.

Eine Anlage zur zweidimensionalen Überlagerung nach diesem Verfahren mit einem Gitter von $h = 15$ und $k = 13$ FÜ-Systemen wurde am IPM der TH Darmstadt 1943-1944 von *de Beauclair* konstruiert (Abb. 116). Zur Darstellung war ein Schleifenoszilloskop vorgesehen. Dieses Vorhaben kam jedoch wegen der Beschaffungsschwierigkeiten und dann wegen Zerbombung Darmstadts nicht mehr zur Fertigstellung und Anwendung. Stattdessen wurde schnell eine Zahlentafel als vorläufiges Rechenhilfsmittel gedruckt [5]; sie blieb aber für lange Jahre ein gern benutztes Werk.

Nach Milderung der Nachkriegs-Schwierigkeiten hat *Prof. H. Witte* / THD mit Mitarbeitern 1948 begonnen, eine Apparatur zur Messung der absoluten Intensität von Röntgenreflexen aufzubauen. 1955 erschien die erste Veröffentlichung über die Elektronendichteverteilung in Steinsalz (Natriumchlorid) [6].

Um eine Schnittlinie zu gewinnen, die zu einer der x- oder y-Achsen parallel liegt, wird einer der Indizes konstant gehalten und die Summe der restlichen Teilschwingungen gebildet. Mehrere derart gebildete Schnittlinien können nebeneinander im Bildschirm gezeigt als Parallelprojektion der zweidimensionalen Überlagerungsfläche angesehen werden. Auch beliebig schrägliegende Schnittlinien lassen sich darstellen, und mit zusätzlichen Hilfsmitteln kann auch ein Höhenschichtlinienbild erreicht werden [3].

Ein Ausweiten des instrumentell-stetigen Überlagerns auf drei Dimensionen, auf räumliche Darstellung, würde nur das als Ergebnis liefern, was vorher durch die Röntgenstrukturanalyse zu erkennen versucht wurde, hat also wenig Sinn; es würde darum gehen, die räumlichen ‚Wellkörper‘ (Abb. 117) entsprechend den Koeffizienten und Phasen im Raum überlagert darzustellen. Allein numerische Berechnung einzelner Werte im Gitter ist nützlich, steht aber hier nicht zur Debatte [3].

Bereits 1949 wurde gewünscht [3], dass wegen der Dringlichkeit der Kristallstruktur-Ermittlung baldigst die sich anbahnende Entwicklung von digitalen Elektronenrechnern zum Ziele führen solle. Die Abkehr von konventionellen analogen Verfahren schien schon damals unausweichlich.

B.9. Nachbildungen und Simulatoren

B.9.1. Schwingungs-Differentialgleichungen

wurden mit Hilfe von elektromechanischen Modellen untersucht, falls sie mathematisch schwer zu erfassen und zu lösen waren und rein mechanische Modelle (s. A.9) nicht ausreichend flexibel waren. Beispielsweise wurden mechanische Pendel mit elektrisch einstellbarer Rückstellkraft und Dämpfung aufgebaut, die durch Drehspul-Momentengeber aneinander gekoppelt waren [1, 2].

Hier erweist sich das Dilemma der Einordnung von komplexen Sachverhalten: TRIDAC, ein elektronischer Analogrechner, ist zwar ausdrücklich zur Simulation der dreidimensionalen Flugzeugbewegungen, aber auch zum Berechnen der dynamischen Kräfte gebaut worden, und daher auch unter C.3.3.1 erwähnt.

TRIDAC = Three Dimensional Analogue Computer wurde 1951-56 von der britischen Firma ELLIOTT BROTHERS im Auftrag der Luftfahrtbehörde gebaut. Zusätzlich zum elektronischen Teil mit 8 000 Röhren in 2 000 Steckeinheiten wurden 15 große ölhydraulische Servo Einrichtungen mit Winkel- und Funktionsgebern vorgesehen; die gesamte Anlage füllte 2 Gebäude und hatte 600 KW Stromverbrauch [3,4] (Abb.137).

B.9.2. Polynome höheren Grades,

die bei Problemen der Filtertheorie auftreten, ließen sich auch mittels einer Überlagerung von sinusförmigen Wechselspannungen mit einstellbaren Amplituden und Phasenwinkeln auflösen (s. auch B.3.2). Eine Anlage dieser Art (Abb. 118) wurde an der TH Stuttgart / Institut für Theorie der Elektrotechnik von *Prof. W. Bader* für Gleichungen 8. Grades und von *K. Franke* fertiggestellt [5].

Auch von *Glubrecht* [6], von *Rasch*, *Tischner* und anderen wurden maschinelle Lösungen für diese Aufgabe ausgearbeitet.

Von *Bader* wurde auch das Prinzip des ‚elektrolytischen Troges‘ (Abb. 119) benutzt zur Auflösung von Polynomgleichungen 9. Grades [7,8].

B.9.3. Partielle Differentialgleichungen

und konforme Abbildungen [8] wurden ebenfalls mit Hilfe des elektrolytischen Troges nachgebildet, indem im Elektrolyten die Werte des sich zwischen entsprechend geformten Rand- und Mitten-Elektroden bildenden Potentialfeldes gemessen wurden [9]. Durch eingesetzte Trennwände aus leitender Folie konnten sogar Bereiche unterschiedlicher Leitfähigkeiten des Elektrolyten gebildet werden.

Ähnliche Lösungswege wurden versucht mit einfachen Anordnungen von Randelektroden auf elektrisch leitendem Papier oder Folie. Dieses war mit schwach leitendem Material beschichtet; zwischen den Elektroden, die den Bedingungen entsprechend gespeist wurden, konnte das sich bildende Potentialfeld mit einer frei beweglichen Prüfsonde ausgemessen werden [10].

B.9.4. Inhomogene lineare Gleichungen

Die Auflösung von inhomogenen Gleichungen mit mehreren Unbekannten wurde ebenfalls von *W. Bader* noch in den Jahren um 1955 mittels ganz spezieller analoger Nachbildungen versucht.

B.9.5. Lineare Gleichungssysteme

wurden durch Netzwerke von Knotengliedern mit einstellbaren elektrischen Eigenschaften nachgebildet; es ist dabei eine Frage der Definition, ob es sich dabei um spezielle analoge Rechenanlagen oder um Nachbildungen handelt [11].

Rechengeräte zur Optimierung der Maschinenauslastung wurden sowohl nach hydraulischem Prinzip (s.A.3.2.3) entworfen wie auch mit elektromechanischen Mitteln. Um 1957 baute GENERAL ELECTRIC / USA für eigenen Gebrauch eine größere Anzahl von Belastungsrechnern PRODUCTRON (Abb. 120).

Es war ein Netzwerk zum Ausmessen der Produktsummen bei 50 x 25 Eingangsgrößen, nämlich Aufträge und Maschinen. Eingebaut waren 50 Drehpotentiometer mit dreistelliger Ziffernanzeige für Produktionsmengen sowie 1250 Justier-Widerstände, mit denen die Eignung der 25 Maschinen für die Erledigung der betr. Aufträge einzustellen war. Mit einem auf die 25 Positionen umstellbaren Messinstrument war manuell nachzuprüfen, ob die jeweiligen Kapazitätsgrenzen überschritten wurden. Die Anlage kostete umgerechnet um die 60 000.- DM.

PRODUCTRON lieferte jedoch nicht automatisch die bestmögliche Verteilung der Aufträge auf die Maschinen; daher wurde anschließend ein leistungsfähigerer Analogrechner entwickelt, der die Probleme einer Produktionssteuerung optimal bearbeiten konnte.

B.9.6. Netzmodelle

Als Beispiel sei eine russische Anlage angeführt, die Erdölfelder überwachen sollte. Sie wurde vom Unionsforschungsinstitut für Erdöl und Erdgas der UdSSR gebaut. Sie hatte die optimale Verteilung der Förderung in bis zu 750 Bohrlöchern zu ermitteln, wenn in 20 000 Knoten die Parameter d. h. die geschätzten Annahmen über Lagerstättenkapazität, Druckgefälle usw. und die Forderungen über Liefermengen usw. eingegeben wurden (s. A.6.8.4). Die Anlage beanspruchte ca. 200 m² Grundfläche und 6-8 Personen zur Bedienung.

Elektrische Netzwerksrechner [12] dienten der Nachbildung der in den Maschen eines weiten Stromverbundnetzes entstehenden Verluste an Spannung und der Stromstärken.

Netzmodelle wurden mehrfach entwickelt und gebaut, weil das Berechnen nach den *Kirchhoffschen* Gleichungen an sich zwar einfach, doch wegen der großen Anzahl nicht durchführbar war. Die SIEMENS-SCHUCKERT-WERKE / Erlangen bauten schon um 1935-1938 ein Wechselstrom-Netzmodell (Abb. 121) [13, 14].

In Frankreich baute *R. Robert* [16] für die ELECTRICITÉ DE FRANCE eine Netznachbildung mit Namen ‚MICRORÉSEAU‘, aber doch mit großen motorgetriebenen Wandlern (Abb. 122).

Die ELECTRICAL RESEARCH ASSOCIATION UK baute um 1955 [17] einen Netzwerk-Rechner (Abb. 123); die vorige und diese Abbildung zeigen auf, wie raumfüllend auch solche Nachbildungen zum messtechnischen Erfassen sonst unzugänglicher weil weiträumiger Anlagen sein mussten.

In den USA wurden zwischen 1929 und 1949 ca. 22 ‚Network-Analyzer‘ installiert. Die Komponenten hatten eine Genauigkeit von rd. 1% Fehler, und die Gesamtanlagen erreichten auch 1% bis schlimmstenfalls 5%. Hier war die Firma WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION mit ANACOM und das CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY führend mit ac- und dc-Anlagen [Fifer, Bd. III, S.742].

Lastverteilungs-Rechengeräte sollten ermöglichen, die in einem Drehstromnetz geforderte Leistung optimal auf die einspeisenden Kraftwerke aufzuteilen. Sie waren komplizierter zu entwerfen, weil die speziellen Charakteristika der einzelnen Kraftwerke, d. h. deren Wirkungsgrade, Kosten und Preise usw. sowie die Netzverluste auf den jeweiligen

Verbindungen zu berücksichtigen d.h. einzustellen waren. Das System musste daher auswechselbare oder einstellbare Elemente für Kostenkurven, Verlustkoeffizienten usw. enthalten.

Bei SIEMENS / Erlangen entwickelte *H. Bauer* dazu den SIELOMAT [15]; ein Prototyp für drei Kraftwerke erwies die Funktionstüchtigkeit. Eine endgültige Ausführung sollte ein Netz mit 20 Kraftwerken nachbilden.

C. Vollelektronische Analogrechner

Eindeutiges Zuordnen von analogen Bauprinzipien der Rechengерäte und Anlagen zur elektromechanischen oder rein elektrischen Ausführungsgruppe war in den meisten der unter B behandelten Fällen kaum möglich gewesen; keine elektrische Schaltung ist ohne elektromechanische Baugruppen wie regelbare Kondensatoren und Widerstände, ohne Hilfsmittel zum Einstellen bzw. Kompensieren, ohne Messinstrumente und Anzeige / Schreibgeräte überhaupt betriebsfähig. Diese Unsicherheit der Definition trifft auch auf dieses Kapitel zu. Als Auswahlkriterien gelten hier mit Niederspannung betriebene Röhren- bzw. später Halbleiter-Schaltungen, mit denen an sich bekannte analoge Rechenabläufe mit bisher nicht realisierbaren Geschwindigkeiten und Leistungen vollzogen werden konnten. Die bislang zu unterscheidenden Gerätetypen zur Ausführung von einfachen arithmetischen Operationen, zum Darstellen und Eingeben von Funktionsverläufen, zur Analyse und Synthese nach Fourierreihen sowie zum Lösen von Gleichungen sind in rein elektronischer Bauweise nicht relevant; fast ausschließlich das Bearbeiten von Differentialgleichungen, also das Thema 'Analoge Integrieranlagen', hat hier ausschlaggebende Bedeutung. Unter dem Sammelbegriff 'Analogcomputer' wurden aber in einer an sich unzulässigen Verengung des Begriffes speziell diese Anlagen verstanden. Sie hatten in vielen Ausführungstypen einige Jahre lang größte Bedeutung für das mathematische Durchdringen technischer Probleme. Hier kann nur auf einige in den Jahren 1945 bis 1970 vornehmlich von der US-Industrie gebauten Typen von Analogcomputern eingegangen werden. Zuvor seien jedoch kurz einige spezielle Vorschläge und Schaltungen angeführt.

C.1. Diverse elektronische Rechenschaltungen

C.1.1. Einrichtung zum statistischen Auf- bzw. Abrunden

Solange bei digitalen Rechenanlagen die Speicher noch platzaufwendig groß und teuer waren und deren Kapazität daher stark begrenzt sein musste, schien es bei manchen umfangreichen Buchungsaufgaben, die nicht mit absoluter Genauigkeit bis auf den fiskalisch maßgeblichen Pfennig arbeiten mussten, z. B. in der Statistik, zweckmäßig, auf zwei Grenzwerte mit kleiner Stellenzahl auf / abzurunden. Falls das nach statistisch gültigem Verfahren abläuft, ergibt sich bei großen Zahlenmengen doch ein richtiges Summationsergebnis. Ein Verfahren wurde vorgeschlagen, mittels Darstellung der Zahlen in einem diagonal geteilten Bildschirm das Auf / Abrunden so zu steuern, dass z. B. alle Werte 75 in genau 75 % aller Fälle auf 100 aufgerundet, in 25 % zu 0 abgerundet werden (1).

C.1.2. Frequenzwandler,

insbes. Frequenzteiler, spielen in der Quarzuhrentechnik eine dominante Rolle.

C.1.3. Variierbare Gleichspannungsverstärker

Arithmetisches Rechelement waren für alle Anwendungsfälle variierbare Gleichspannungsverstärker mit hohem Eingangswiderstand, sehr niedrigem

Ausgangswiderstand und großer Leerlaufverstärkung. Der Ausgang war durch einen Ohmschen Widerstand oder eine Kapazität auf den Eingang zurück gekoppelt. Im ersten Fall wirkte er (bei Anschaltung mehrerer Eingänge) als Addiator, im zweiten als Integrator. Während mechanische Integratoren wie alle mechanischen Geräte bei Stillstand ihre Position beibehalten, und auch die Impulse summierenden Integratoren im Stand keinerlei Änderung des Zählers zeigen, schwinden die elektrischen Ladungen in Kondensatoren mit der Zeit: damit ändern sich also die Charakteristika der Schaltkreise; der Nullwert driftet.

Erst durch eine ‚Chopper-Stabilisierung‘ mit einem mechanischen Unterbrecher bzw. einer elektronischen Schaltung sicherte *Goldberg* [2] um 1947 die Stabilität. Auch genaue Linearität war Voraussetzung. Die von *G. A. Philbrick* und *C. A. Lowell* [1] erarbeiteten Rechen-‚Operationsverstärker‘ ‚OV‘ gewannen ab 1960 eine Verstärkung von mehr als 107. *Philbrick* hatte wohl um 1937 bereits einen Analogrechner gebaut, der jetzt im SMITHSONIAN INSTITUTE MUSEUM OF HISTORY AND TECHNOLOGY / DC stehe. Die Eingabe von Werten einer vorgegebenen beliebigen Funktion erfolgte wie bei elektromechanischen Geräten durch deren Annäherung als Tangentenfolgen mittels Diodenketten und abgestuft einstellbaren Widerständen. Eine so gebildete Parabel diente auch als quadrierendes Element zur Multiplikation nach der Formel $xy = (x+y)^2/4 - (x-y)^2/4$

C.1.4. Das Siemens-Regelmodell

war ein spezieller Analogrechner zur Bearbeitung aller denkbaren Fälle von Regelaufgaben, insbesondere bei der Projektierung und Bemessung regeltechnischer Anlagen [3, S. 159]. Einheitliche, miteinander verkoppelbare Standard-Baueinheiten erlaubten, wahlweise durch einfaches Auswechseln eines Funktionssteckers auf die verschiedensten Übergangsfunktionen eingerichtet zu werden. Sie waren jeweils rückwirkungsfrei und konnten daher beliebig verknüpft werden. Ein Störwertgeber bildete Sollwertänderungen nach; ein Schnellschreiber zeichnete den Verlauf der jeweils interessierenden Regelgröße auf Wachspapier. Auch Wiedergabe als stehendes Bild auf einem Oszillographen war möglich (Abb. 124).

C.2. Elektronische Ziffern-Integrieranlagen „Digital Differential Analyzer DDA“ [5]

Nachdem im Zuge der Entwicklung der Digitalcomputer einige Speicherarten für Impulse / Bits entstanden waren, konnte es nicht ausbleiben, dass auch das Prinzip der Inkremental-Integrieranlage, wie es *Bückner* mit dem INTEGRO-MAT (Abb. 112) mit elektromechanischen Mitteln realisiert hatte, nun mit elektronischen Schaltungen und Speichern gebaut wurde [1]. Allerdings wurde das parallel-simultane Rechnen bald aufgrund der hohen Arbeitsgeschwindigkeit der neuen Technik zugunsten eines viel geringeren Aufwandes an Rechenbaugruppen bei einer seriell-sukzessiven Folge der Impulsverarbeitung als unnötig vermieden. Das Prinzip der sozusagen simulierenden Nachbildung der vielen gleichzeitig wirksamen Rechenglieder der zu Grunde liegenden Gleichung wurde also aufgegeben. Aus der Schalttafel für die Verbindungsleitungen wurde nun das Programm für die Aufeinanderfolge der Operationen in dem einen Summierspeicher.

C.2.1. MADDIDA

Dieser ‚Magnetic Drum Digital Differential Analyzer‘ wurde von *F. G. Steele* / Northrop Aircraft, Inc., in Hawthorne, USA bereits 1948-50 gebaut [2]. Schneller Umlaufspeicher für die Impulsreihen war eine Magnetspeichertrommel mit 6 Spuren; er arbeitete demzufolge

nicht simultan wie der Integromat in allen Rechengliedern, sondern seriell. Ein Grundtakt von 95 kHz wurde aus einer der Spuren ausgelesen und auf 2 Registerspuren für bis zu 44 Wörter zu je 44 bit verteilt aufsummiert (=integriert); 2 weitere Spuren nahmen Adress- und Funktions-Inkrementen auf. Die Adress-Spur erhielt zu Beginn (von Hand oder per Lochstreifen) das Programm eingegeben. Die 5. Spur war ein Zwischenspeicher für die zu summierenden Impulsfolgen [2]. Nachfolgende Bauausführungen (von LITTON 1957) hatten eine Wortlänge von nur 32 bit, ebenfalls 44 Integratorbereiche und kamen auf einen Zyklus von 67 Abläufe/sec, was der Umdrehungszahl der kleinen Trommel entsprach. MADDIDA war klein wie ein Kühlschrank, ebenso preiswert und rechnete auf einige Dezimalen genau. 15 wurden in Betrieb genommen [3].

In den USA wurde eine ganze Reihe von solchen seriellen Digital-Differential-Analysern gebaut; es waren u.a. die Modelle CRC 101 und 105 der COMPUTER RESEARCH CO. / USA [1c], von BENDIX AVIATION CO. 1954 der D-12, sowie von LITTON INDUSTRIES, LINTRONIC LTD (1957) DLS-63, von COMPUTER SYSTEMS u.a. Sie waren bei Wahl einer genügend großen Wortlänge zwar genauer als die stetig integrierenden Analogrechner, doch dann sehr langsam. Sie wurden deshalb vor allem dazu eingesetzt, eine genaue Lösung eines Problems zu erhalten, um die anschließend mit schnelleren Analogrechnern erhaltenen Ergebnisse vergleichsweise überprüfen zu können (s. C.3) [25].

C.2.2. TRICE

Diese aufwendigere Simultan-Ziffern-Integrieranlage wurde 1958 von PACKARD BELL COMPUTER CORPORATION / USA in der neuen Halbleitertechnik gebaut [4,5]. Sie arbeitete mit einer Zyklusfrequenz von 100 kHz, die Grundfrequenz war 3 MHz, Wortlänge war 30 bit. Jeder der vielen Integratoren hatte 3 Register in Form von Verzögerungsleitungen mit 10 sec Umlaufzeit (was der Wortzeit entsprach). Das erste Register übernahm den Anfangswert, das zweite dazu die Funktions-Inkrementen, das dritte enthielt den neuen Integralwert. Es gab noch spezielle Summierer, Multiplikatoren und Logikschalter; die Einzelgeräte arbeiteten zeitgleich parallel und wurden mit Steckschnüren untereinander verbunden. Man versuchte auch, einen DDA-Differentialanalyzer auf einem digitalen Elektronenrechner zu simulieren, indem man dessen einziges Rechenwerk nacheinander die vielen Summationen auszuführen programmierte (z.B. IBM 701).

C.3. Elektronische Analogrechner

Die vorerwähnten Schaltelemente zum Vollziehen von mathematischen Operationen wurden von *H. Kleinwächter* schon um 1939 vorgeschlagen; er empfahl u.a. [15] die Verwendung von Drosseln zum Integrieren und spezielle Kathodenstrahlröhren zum Addieren und Multiplizieren.

Im Allgemeinen bezeichnet der Ausdruck „Analogrechner“ nur diejenigen Systeme, bei denen die Rechengrößen kontinuierlich veränderlich sind (also nicht die DDA-Anlagen). Elektrische Analogrechner könnten zwar Gleich- oder Wechselstrom als Variable benutzen, doch sind fast ausschließlich Gleichstromgeräte gebaut worden, weil die Wechselstromrechner doch relativ langsame, mechanisch bewegt motorgesteuerte Bauelemente (Servo-Potentiometer, Drehtrafos und dergl.) enthalten müssen.

Je nach Verwendungszweck wird dabei versucht, den Rechenablauf entweder so langsam abzuwickeln, dass schreibende Messgeräte eine Lösungskurve aufzeichnen können, oder so schnell, dass ein repetierender Betrieb mit sich wiederholender Ergebnisdarstellung auf dem Bildschirm einer Katodenstrahlröhre möglich ist.

Wie bei den zuerst noch in Betrieb befindlichen mechanischen Integrieranlagen muss auch hier für jede Operation ein gesondertes Funktionsteil vorhanden sein, die alle durch Verbindungskabel nach Vorschrift der mathematischen Gleichung miteinander zusammengeschaltet werden. Sie alle arbeiten gleichzeitig, maßgebend ist als unabhängige Veränderliche nur der Zeitablauf; Stiltjes-Integrale können also nicht bearbeitet werden bzw. nur auf Umwegen. Die Verkopplungskabel zwischen den einzelnen Rechenverstärkern und -elementen wurden bald als Steckschnüre für eine zentrale Stecktafel mit vielen (bis zu 4096) Buchsen ausgebildet. Diese Stecktafel war zuerst fest einmontiert, später erleichterte man den Programmierern die Arbeit, indem mehrere solcher Tafeln austauschbar gemacht wurden und also in Ruhe vorbereitet werden konnten.

C.3.1. Entwicklungen in Deutschland

C.3.1.1. H. Hoelzer

Elektronische Bauelemente wurden erstmals von *H. Hoelzer* / Peenemünde ab 1939 zum Bau einer analogen Integrieranlage benutzt. Er fügte zu den an sich bekannten Schaltkreisen aus Kondensator und Widerstand noch einen Verstärker und eine Rückkopplung hinzu, um deren Fehler zu kompensieren. Auch Doppelschaltungen mit gemeinsamer Rückkopplung und der Einfluß von Phasendrehungen im Rückkopplungskreis wurden in seiner Dissertation [16, 17] untersucht. Er hatte damit den Weg eröffnet, auch sehr langsame Frequenzen, insbesondere Schwingungszustände von mechanischen Gebilden im Analogrechner nachzubilden. Es handelte sich dabei um die Lage- und Stabilitätsregelung des dort entwickelten Raketen-Flugkörpers V2. Diese wurde erst mittels der Üblichen apparativen Regeltechnik unter Einsatz von teuren Baugruppen untersucht, konnte dann aber durch diese Simulation ersetzt werden. Weiterhin entwickelte *Hoelzer* elektrische Schaltungen zum Multiplizieren, Potenzieren, Dividieren und zum Wurzelziehen unter Verwendung von Ortskurvenverfahren, die für Stabilitätsuntersuchungen rückgekoppelter Systeme damals als zweckmäßig eingeführt wurden. *Prof. A. Walther* (und der Autor) konnten am 1.7.1943 die streng geheime Anlage in Peenemünde besichtigen. Sie war wohl die erste, die im praktischen Betrieb Erfolg hatte, denn der 'electronic differential analyzer' von *J. M. Jackson* / GB wurde erst 1945 beschrieben [18]. Die Anwendung von *Hoelzers* Erfindung auf das vorliegende Problem musste auf Grund einer Verfügung der Besatzungsmächte aus seinem Dissertationsentwurf abgetrennt werden [17, 88] und konnte erst später in einem zweiten Teil der Dissertation beschrieben werden.

Im Herbst 1943 wurde die Heeresversuchsanstalt durch einen Luftangriff weitgehend zerstört und *Hoelzers* Analogrechner damit auch. *Hoelzer* wurde später nach dem Einmarsch der US-Sieger mit der Entwicklungsgruppe von *Braun* nach Huntsville / ALA übersiedelt und lebte noch 1994 dort. Auf Betreiben von *Hadwig Dorsch* am Deutschen Technikmuseum Berlin baute er seine Erfindung nochmals und übereignete diesen Nachbau dem Museum (Abb. 125).

C.3.1.2. ELARD / TH Darmstadt

An der Techn. Hochschule Darmstadt wurde ab 1954 von *Prof. F. W. Gundlach* und *W. Dhen* vom Institut für Fernmeldetechnische Geräte und Anlagen ein Elektronischer Analogrechner ELARD (Abb.126) entwickelt und gebaut und 1958 am Institut für Prakt. Mathematik von *Prof. A. Walther* in Betrieb genommen; es war der erste in der Bundesrepublik [19, 20, 21]. ELARD hatte 16 gegengekoppelte Rechenverstärker, vier Multiplikatoren (selbstentwickelte Hyperbelfeld-Kathodenröhre mit 100 kHz), dazu vier Funktionsgeneratoren mit Dioden-Netzwerk und eine Anzeigeröhre. Er repetierte mit 25 Hz (jeweils 0,02 s Rechenzeit und Pause). Der Rechenfehler lag bei 1%.

C.3.1.3. UNIMAR / Uni Berlin

Das Institut für Regelungstechnik der Universität Berlin entwickelte bis 1959 den Analogrechner UNIMAR I. [24]

C.3.1.4. EARI / Ilmenau

Die Hochschule für Elektrotechnik / Ilmenau entwickelte die Elektronische Analogie Rechenanlage EARI (Abb.127). Diese hatte Wiederholungsfrequenz von 5, 10 oder 20 Hz bzw. war bis 500 Hz synchronisierbar. Der modulare Aufbau bestand aus 18 Integratoren (Abb. 128) mit 5 Multiplikatoren, 5 Funktionsgebern und anderen Baugruppen [24].

C.3.2. Erste industrielle Analogrechner in Deutschland

Von der deutschen Industrie wurde um 1956, also fast gleichzeitig mit der von Computern, mit der Entwicklung von elektronischen Analogrechnern begonnen, zuerst noch in der gut beherrschbaren Röhrentechnik. Es wurde Wert darauf gelegt, dass der Analogrechner als Simulator mit technischen Gebilden zusammen, also langsam arbeiten konnte, und das Ergebnis in elektrisch angesteuerten Kurvenzeichnern ‚Plottern‘, (Abb.130) aufgezeichnet wurde. Dann, im Laufe der Entwicklung selbständiger Analogrechner wurde die Anzeige des Ergebnisses als stehendes Bild in einer Bildröhre gewünscht und also schnell repetierende Arbeit [26, 27, 28].

C.3.2.1. Schoppe & Faeser R4

SCHOPPE & FAESER GMBH / Minden entwickelte 1957 den repetierenden Analogrechner R4 (Abb. 131) mit Wiederhol-Frequenz von 9 Hz zwecks Darstellung im Bildschirm; die Genauigkeit lag zwischen 1 und 5%. Das Gestellpult umfasste 12 Recheneinschübe, die direkt verdrahtet wurden. Eine Anlage steht im Deutschen Museum in München [11 S.155].

C.3.2.2. Telefunken RA 463/2

TELEFUNKEN GMBH / Ulm (später Konstanz, *E. Kettel*) baute 1957 (von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert) eine Serie von 10 Röhren-Analogrechnern RA 463/2 (Abb. 132) mit variabler Rechenzeit (0,1-112 s). Eine zweite Serie mit 10 Anlagen wurde bald aufgelegt. 1961 waren 16 Anlagen an Hochschul-Instituten und eine bei der AEG in Betrieb. Für Aufgaben mit längeren Rechenzeiten konnten Zehnhacker-stabilisierte Verstärker eingesetzt werden. In Normalausführung umfasste dieser Rechner in 3 Schränken im Wesentlichen 24 + 8 Rechenverstärker, 8 Multiplizierer, 3 Funktionsgeber (mit Polygonzug zu 10 Diodenstrecken), 48 Koeffizienten-Potentiometer und 1 Sichtgerät, aber noch kein auswechselbares Programm-Steckbrett. Die Genauigkeit dieser Einzelgeräte war besser als 0,5 % und der statische Rechenfehler 0,5 %.

C.3.2.3. Telefunken RA 800

Telefunken (*Güntsch, Meyer-Brötz* u. a.) hatte um 1959-60 dieses Präzisions-Modell auch in einer neuen Transistor-Version RA 800 herausgebracht (Abb. 133). Diese war nicht nur 3:1 kleiner (nur 2 Schränke) und wog nur noch 80 kg statt vorher 500 kg; sie verbrauchte auch deutlich weniger Energie. Sie hatte (jetzt ausreichend) bis 100 Potentiometer, 64 Chopper-stabilisierte Gleichstrom-Operationsverstärker, je 8 Multiplikatoren und Funktionsgeber, und rechnete mit höherer Genauigkeit von 0,01%. Eine dieser Anlagen kam 1966 in das Deutsche Rechenzentrum Darmstadt.

C.3.2.4. TELEFUNKEN RAT 700 und RA 742

TELEFUNKEN RAT 700 und RA 742. Der kleine 1961 transistorisierte Tisch-Analogrechner mit 25 OV (Abb. 134) konnte Langzeitrechnen (0,1 - 100 s) und repetieren. Er hatte nur ein festes Steckbuchsenfeld, 8 Parabelmultiplikatoren, 2 Funktionskurvengeneratoren (mit 20 Knickpunkten) und rechnete mit einem mittleren statischen Fehler von weniger als 0,5%. Ein Sichtgerät, ein Koordinaten-Schreiber und weitere RAT 700 konnten angeschlossen werden, ebenso ein Digitalrechner (Abb. 145).

C.3.2.5. endim 2000 /Glashütte

In der DDR baute ferner der *VEB RECHENELEKTRONIK GLASHÜTTE* 1962-1964 den Röhren-Analogrechner endim 2000 in einer Serie von 20 Stück (Abb.129).

C.3.3. Der Höhenflug der industriellen Analogrechner

C.3.3.1. Anfangsentwicklung weltweit

In Europa außerhalb Deutschlands und in Japan wurden ab etwa 1959 in steigendem Ausmaß elektronische Analogrechner erst in Röhrentechnik, dann nur noch mit Transistoren entwickelt und industriell gefertigt. Bereits 1957 hatte aber BROWN BOVERI & Co BBC / Mannheim einen analogen Regelrechner für Walzwerke in sparsamer aber sehr zuverlässiger Technik mit Magnetverstärkern gebaut.

- W. GÜTTINGER / Niderteufen (Schweiz) baute einen Auf Tischrechner AR mit 12 DC-Operationsverstärkern (OV) mit 0,1 bis 100 s repetierend.
- OLIVETTI / Ivrea baute die Integrieranlage ELEA 6001.
- WROCLAWSKIE ZAKLADY ELEKTRONICZE / Wroclaw baute einen ELWAT-1.
- In Frankreich lieferten LABORATOIRES R. DERVEAUX / Boulogne s.Seine den DJINN 32 AC mit bis zu 30 Rechenverstärkern mit Röhren, und die SOCIÉTÉ D'ELECTRONIQUE ET D'AUTOMATION SEA / Courbevoie / Seine den OME P-2 für 24 DC-Operationsverstärker mit Röhren und ein Tischgerät mit 12 OV in Transistortechnik.
- In Belgien bauten die ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE CHARLEROI SA um 1962 noch den ACEC 4000 in Röhrentechnik (Abb.135).
- In Großbritannien gab es die G-PAC Analogrechner (Abb. 136) von ELLIOTT BROTHERS LTD / Borehamwood und auch ein kleines Tischgerät für 10 OV;
- SHORT BROTHERS & HARLAND LTD / Belfast baute ebenfalls große Anlagen und Auf Tischgeräte, und SOLARTRON ELECTRONIC GROUP LTD die großen SPACE, ferner die MINI-SPACE in Pultform mit 10 OV.
- ELLIOTT baute um 1951-56 im Auftrag des ROYAL AIRCRAFT ESTABLISHMENT / Farnborough einen großen Simulator für Probleme der Flugdynamik von Bodengesteuerten Flugkörpern, den großen TRIDAC = Three Dimensional Analogue Computer (Abb. 137). Dieser ist wegen der zugehörigen und sehr umfangreichen elektromechanischen Einrichtungen in B.9.1 angeführt.
- In der CSSR lieferte die Firma TESLA / Pardubitz Lehr- und Übungs-Auf Tisch-Rechner TESLA AP-S mit 8 Transistor-OV, von denen 6 als Integratoren dienen konnten.
- ARITMA / Prag lieferte seit 1964 die MEDA-T Tischgeräte (Abb. 138) mit 14 bis 20 OV in den Modellen 21 TS, 41 T sowie MEDA 81 T mit 30 OV und mit

Lochstreifenleser zur Befehlseingabe, ein Anfang zur Hybridtechnik mit dem Modell MEDA 41 TC.

- In der UdSSR entstanden in den Instituten der AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN bis 1946 schon mehrere, z. T. auch in Serie gebaute Anlagen [4], so unter anderen die IATAN EMU-5, ein kleiner Auf Tisch-Rechner mit 6 OV und IPT-4 (mit 12) und IPT-5 (mit 18 OV); deren Genauigkeit lag wegen Drift bei 5...10 %. Ferner: ein MN-7 Röhren-Auf Tischrechner von 1957 wurde fortentwickelt zu MN-10 M in Transistortechnik mit 24 OV (1964). MPT-9 mit 12 dc-Stufen und MPT-11; MN-2 und MN-7, Universalrechner mit 18 OV, MN-7 und MN-9 als Tischgeräte und später MN-10-M (Abb. 139).

Dass in der UdSSR unter der zentralen Steuerung der AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN in den ihr unterstellten Instituten (IATAN) die Entwicklung von analogen (wie auch von digitalen) Rechenanlagen sehr erfolgreich betrieben wurde, beweist ihr Vorsprung in Raumfahrttechnik.

- In Japan gab es von NIPPON ELECTRIC COMP. die NEAC R3 mit 12 OV, repetierend in 20..100 ms, und die P3 (langsam in 30 s aufzeichnend) mit 28 OV.
- TOKYO SHIBAURA baute TOSAC I und II (langsam), TOSAC III (repetierend) und TOSAC IV (Auf Tisch-Gerät).

C.3.3.2. Der Boom in den USA

Nachdem die ersten Grundlagen erarbeitet waren, kam die Entwicklung von elektronischen Integrieranlagen relativ schnell voran. Zuerst wurden in den Labors ‚langsame‘ (weil mit mechanischen Elementen durchgesetzten) Wechselstrom-Schaltungen (in den USA ‚D.C.-circuits‘ benannt) bevorzugt, die dem Versuchingenieur mit den als Ergebnis aufgezeichneten Lösungen der Gewohnheit entgegen kamen. Hier sind zu nennen die Arbeiten von C. A. Lovell der BELL TELEPHONE LABS an Röhrenschaltungen, die um 1940 ihren Anwendungs-Durchbruch sahen [6a]. Als aber das anfangs prohibitive Problem der langsamen Drift bei Gleichstrom-Verstärkern durch die um 1950 von E. A. Goldberg / RCA LABS erfundene Zerhacker- (‚Chopper‘-) Stabilisierung, gelöst worden war [5, Bd. 4,5 S. 46], wurden nur noch diese sogleich allgemein angewendet. Die steigenden Anforderungen seitens der meist militärischen Erstanwender führten zu einem breiten Vordringen der jetzt vielerorts ab etwa um 1950 entwickelten vielseitigeren Gleichstrom- (d. c.-) Analogrechnern, die schnelleren Arbeitstakt, stetig repetierende und dadurch sichtbare Ergebnis-Anzeige in Kathodenstrahlröhren ermöglichten.

Grund dafür war die fortschreitende Automation der Waffentechnik, insbesondere der Flugabwehr, die bisher viele gut ausgebildete Bedienungskräfte an den langsamen opto-mechanischen Richtgeräten der Flakkanonen brauchte. Wie für die Berechnung von Schusstabellen war die US-Luftwaffe auch hier genötigt, auf die erst ungeliebte Elektronik mit vielfach schnelleren Einrichtungen umzusteigen. Das wurde ein effektiver Erfolg: Bis 1944, dem Höhepunkt der deutschen Angriffe auf Südengland mit den unbemannten V1-Flugbomben, wurden von der britischen Verteidigung mit neuen Radar-gestützten elektronischen Richtgeräten schließlich bis zu 74 %, insgesamt 1.550 V1-Flugkörper im Anflug zerstört [10, S.19].

Mit dem Beginn der Serienfertigung von Halbleiterelementen um 1955 wurde die bisherige Röhrentechnik abgelöst durch die Halbleitertechnik. Sie brachte eine revolutionäre Verkleinerung von Abmessung und Leistungsverbrauch bei besserer Zuverlässigkeit mit sich, besonders nachdem ‚integrierte Schaltungen‘ viele Komponenten in einem einzigen Bauteil zusammenbrachten (Abb. 140).

In den USA gab es 1957 rd. 15 Firmen, die vorwiegend repetierende Transistor-Analogrechner lieferten. Sie hatten mit einem vielfältigen Sortiment von kleinen Auf-Tisch-

Rechnern bis zu Großanlagen breite Anwendung gefunden und es gab einen stark propagierten Schatz an Erfahrungen damit; es ist nicht erstaunlich, dass auch deutsche Kunden sich vornehmlich von US-Firmen beliefern ließen.

Es waren beispielsweise die Firmen:

- BECKMANN INSTRUMENTS, Inc. / Fullerton, CA. baute die Reihe der großen Schrank-Modelle EASE 1032 bis 1100 mit zentralem Steckbuchsensbrett für 60 Operationsverstärker OV, für bis 100 Multiplizierer, 20 Funktionsgeneratoren und einem 8-fach Schreiber.
- DONNER SCIENTIFIC Comp. / Berkeley, CA. baute ab 1964 ein kleines Auf-Tisch-Modell 1403 und 3000 (Abb. 141) und die größeren 3000/3400 mit 10 bzw. 30 OV.
- EAI = ELECTRONIC ASSOCIATES, Inc. / Long Branch, N.J., baute die PACE 16-31, TR 48 (Abb. 142) und PACE 231-R.
- GOODYEAR AIRCRAFT CORPORATION baute GEDA.
- HEATH baute um 1966 kleine Geräte (Abb. 143), lieferte aber vor allem für den Eigenbau Material und beliebig zu Großanlagen zusammenstellbare Rechenbaugruppen ('Heathkit').
- MID CENTURY CORPORATION / New York baute MC400 und 500.
- G.A. PHILBRICK RESEARCHES, Inc. lieferte gut durchdachte ,d.c.'-Elemente für den Eigenbau und auch den Rechner K-5-U (Abb. 144).
- REEVES INSTRUMENT REAC lieferte seit 1946 die Serie 400 in ausbaufähiger Schrankform; es gab 6-fach-Tintenschreiber, eine Schreibmaschinen-Ausgabe und ein Programmiergerät mit Lochstreifenleser.

C.3.4. Hybridrechner

In der Literatur wurden auch inkrementell-analoge Impuls- Ziffernrechner (DDA, TRICE...) als hybride Analogrechner bezeichnet. Entwicklung, Bau und Anwendung der elektronischen Analogrechner erhielten mit dem schnellen Fortschritt der Digitalcomputer in den Jahren ab 1960 eine neuartige Zielrichtung. Gewünscht wurde die Kombination der beiderseitigen Vorteile: größere Genauigkeit des vielstelligen numerischen Rechnens und schnellere Arbeit des parallelen Integrierens [31]. Es begann sozusagen schon mit dem Einbau von digitalen beliebig aufschaltbaren Messgeräten und Schreibern, und dann mit dem Hinzufügen von digitalen Schaltkreisen zum Steuern und Eingeben von Parametern, insbesondere für den Fall, dass viele ähnlich Rechengänge zum Bearbeiten von Iterationsverfahren, von Randwertaufgaben und statistischen Problemen jeweils mit abgeänderten Anfangswerten zu durchlaufen waren.

Der Analogteil musste dazu mit digital einstellbaren Servo-Potentiometern ausgerüstet werden, ferner war statt der üblichen Stecktafel zum Zusammenschalten der Rechenkomponenten nun ein Koordinatenschalter einzubauen; dieser musste vom Digitalteil beeinflusst werden. Zwischen den beiden Hauptgruppen Analog- und Digitalrechner musste bei Bedarf an größerer Variationsbreite eine dritte Komponente, ein Koppellement geschaltet werden, welches insbesondere Analog-Digital- und D-A-Wandler enthielt; im einfachsten Fall nur einen, zumeist aber mehrere, die parallel in beiden Richtungen zu arbeiten vermochten. Die Ergebnisse wurden numerisch weiter verarbeitet, aufgelistet oder mit einem digitalen Plotter aufgezeichnet. Ziel dabei war, beide Rechnertypen gemeinsam auch dynamische Prozesse ausreichend genau bearbeiten zu lassen. Die Komplikation der Kopplung von digitalen und analogen Rechnern war dabei in Kauf zu nehmen für die Aufgaben der Echtzeit-Simulation bei dynamischen Systemen mit zumindest teilweisen hohen Schwingungsfrequenzen. Hier ist die Lösungsgeschwindigkeit der iterativen

numerischen Integrationsverfahren viel zu gering; etwa oberhalb von 1 Hz kann nur noch analog gearbeitet werden. Beispiel hierfür ist die Simulation des Verhaltens eines gelenkten Flugkörpers. Dessen Flugbahn und die dabei notwendigen Koordinaten-Transformationen müssen digital genauestens berechnet werden, was Zeit braucht und auch Zeit hat; das für dessen Eigendynamik zuständige Bordregelsystem aber muss schnellstens reagieren und also analog arbeiten.

Es gab daher eine Vielzahl von Ausführungsformen solcher ‚Hybridrechner‘: kleine Auf-Tisch-Geräte nebeneinanderstehend in fast beliebiger Zusammenstellung (Abb. 139, 140, 141, 142):

- von TELEFUNKEN/AEG den RA 742 mit Digitalzusatz DEX 102 (Abb. 145) und von HITACHI den Desk-Top Rechner 220/240 (Abb. 145).
- Eine große, raumfüllende Hybridanlage wurde vom Institut für Regelungstechnik der Universität Berlin gebaut: UNIMAR II hybrid (Abb. 147).
- Ferner gab es die Telefunken RA 770 in Tischgröße (Abb. 148) und den großen HRS 900 aus RA 770 +CAE C90-40 (Abb.143)
- sowie den Hybridrechner MEDA 41 TC von ARITMA/Prag.

Hybridrechner wurden für die angesprochenen Aufgaben solange notwendig, wie die Digitaltechnik ihren Nachteil des 'langsamen' numerisch-seriellen Rechnens nicht abstreifen konnte. Sie waren aber als Kombination zweier grundverschiedener Prinzipien weder einfach zu planen und zu programmieren noch zu betreiben.

Im Verlauf der Miniaturisierung der Digital-Module, des vorher nicht zu ahnenden Preisverfalls und der unglaublichen Steigerung des Schalttaktes (1998 bis 300 MHz Taktfrequenz) wurde es denkbar, Digitalcomputer mit erst wenigen, dann vielen parallel arbeitenden Rechenprozessoren auszurüsten, um so die wichtigen Aufgaben, sofern sie sich in simultan bearbeitbare Teiloperationen auflösen ließen, auch tatsächlich parallel auszuführen. Diese Entwicklung führte über Multiprocessor-Computer schließlich zu ‚massiv-parallelen‘ Computern und ‚zellularen Automaten‘. Analogrechner, auch hybride, haben im Allgemeinen demgegenüber ab etwa 1970 keine Chance mehr; es ist in der Rechentechnik wie auch sonst eine fast restlose Abkehr von der analogen Gesamtschau hin zum Rasterpunkt-Denken zu verzeichnen.

Die Entwicklung wird aber weiter zur Vernetzung von sehr vielen Mini-Prozessoren zu einem ‚rechnenden Raum‘ führen, wie ihn *Konrad Zuse*, der Computer-Pionier, schon 1969 erträumte [32, 33]. Dieser aber ist ja schließlich wieder ein Analogon der physischen Erscheinungen.

D. Schlussbetrachtung

D.1. Ist die analoge Denkweise am Ende?

Mathematische Instrumente und analoge mathematische Maschinen haben gegenüber den uralten Zeichen- und Rechenhilfsmitteln nur etwa 150 Jahre Zeit gehabt, zu keimen, zu wachsen und zu reifen; jetzt sind sie kaum mehr als seltene Erinnerungsstücke. Sie sind in unserer schnelllebigen Zeit auch nicht derart Objekt der Bewunderung wie etwa die Kultfigur Oldtimer-Auto, obschon jeder Ingenieur damals zu seiner Arbeit einen Rechenschieber benutzen musste und diesen als Statussymbol in der Brusttasche steckend zeigte. Nur in wenigen der technisch orientierten Museen sind Relikte an mathematischen Instrumenten zu besichtigen.

D.2. Museen und Sammlungen mit analogen Geräten

Bewundernswerte Ausnahmen in Deutschland sind besonders die reichhaltigen Sammlungen analoger Geräte in folgenden Museen und Sammlungen:

- Analogrechnermuseum, Prof. Dr. Bernd Ulmann, <http://analogmuseum.org/>, Schwalbacher Strasse 31, 65307 Bad Schwalbach/Hettenhain (Besichtigung nach Voranmeldung möglich)
- HNF Heinz Nixdorf MuseumsForum, Fürstenallee 7, 33102 Paderborn
- Deutsches Museum, Museumsinsel 1, 80538 München (mit gut bestückter Sammlung bis zum DGM IPM-OTT und dem RAT 700)
- Deutsches Technik-Museum, Trebbiner Str. 9, 10963 Berlin (mit dem Nachbau von *Hölzers* Analogrechner)
- Museum für Astronomie und Technikgeschichte, Orangerie, 34134 Kassel
- Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Mathematik, Maschinen und Datenverarbeitung, Martensstraße. 3, 91058 Erlangen

D.3. Weiterführende Literaturverzeichnisse analoger Instrumente

- *Fifer, Stanley*: Analogue Computation – Theory, Techniques and Applications, Vol. III, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.
- *Galle, A.*: Mathematische Instrumente. TEUBNER, Berlin & Leipzig 1912 (mit Übersicht über die Entwicklung sowie 125 Literaturangaben).
- *Meyer zur Capellen, W.*: Mathematische Instrumente. 3. Aufl. 1949, AKADEM. VERLAGSGES., Leipzig (mit 346 Literaturangaben bis zu den ersten Integrieranlagen und Röhrencomputern).
- *Ulmann, Bernd*: Analogrechner: Wunderwerke der Technik – Grundlagen, Geschichte und Anwendung. OLDENBOURG, München 2010.

- *Walther, Alwin* und *H.-J. Dreyer*: Mathematische Maschinen u. Instrumente, instrumentelle Verfahren, in: *Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939-1946*, Verlag Chemie, Weinheim, Bd. 3, Teil I (190 Titel werden besprochen).
- *Willers, Friedrich A.*: Mathematische Maschinen und Instrumente. AKADEMIE-VERLAG, Berlin 1951 (871 Literaturzitate bis zu ENIAC und Integrieranlagen machen ,den Willers' zum umfassendsten Lehrbuch).
- Führer durch die Ausstellung Informatik und Automation des Deutschen Museum München, 1990 (Aufzählung und Beschreibung auch der Analog-Geräte der reichhaltigen Sammlung).

Literatur-Titel aus den genannten Büchern von *Fifer*, *Meyer zur Capellen* und *Willers* wurden nur ausnahmsweise nochmals im vorliegenden Text angeführt; Literaturnummern sind in eckige [Klammern] gesetzt.